DER DYNAMISCHE FLUG.

VON

PROF. GEORG WELLNER.

SONDERABDRUCK AUS DER FESTSCHRIFT DER K. K. TECHN. HOCHSCHULE IN BRÜNN ZUR FEIER IHRES FÜNFZIGJÄHRIGEN BESTEHENS UND DER VOLLENDUNG DES ERWEITERUNGSBAUES IM OCTOBER 1899.

BRÜNN, 1899.
VERLAG DER K. K. TECHNISCHEN HOCHSCHULE.
DRUCK VON RUDOLF M. ROHRER.

[redacted]

20. 10. 99.

r dynamische Flug.

Von

Prof. GEORG WELLNER.

55 apr

Der dynamische Flug.

Von

PROF. GEORG WELLNER.

Vorwort.

Über der festen Erde und dem Wasser steht die Luft ausgebreitet, ein elastisches Gas von veränderlicher Dichte, stets Wasserdunst enthaltend, dessen Sättigung zeitweilig Nebel, Wolken, Regen, Schnee verursacht; in ihrer leichten Beweglichkeit oft sanft, oft kräftig blasend, manchmal vollkommen stille, dann wieder brausend im Gewittersturm; ein ewig wechselvolles Bild. Der Luftocean umschließt in einer mächtigen Kugelschale den Erdball und verbindet alle Orte miteinander.

Während die Locomotive längs der Bahnlinien auf dem Lande rollt und das Dampfboot die Wasseroberfläche furcht, bieten sich dem fliegenden Luftschiffverkehre alle drei Dimensionen des Raumes dar. Dieser Transportmethode, dem Fluge durch die Luft, hinderlich gegenüber stehen einerseits die zur Erde niederziehende Schwerkraft, anderseits das launenhafte Spiel der Winde. Bei der stofflich dünnen Beschaffenheit der Luft — sie ist an 800mal leichter als das Wasser — ist es zur Schaffung brauchbarer Auftriebskräfte an Tragflächen irgend welcher Art unbedingt erforderlich, große Geschwindigkeiten anzuwenden; die große Betriebsgeschwindigkeit entspricht dem modernen Zeitbedürfnisse und gibt uns zugleich das beste Mittel an die Hand, den Einfluss des Windes zu besiegen, indem wir ihn an Raschheit noch überflügeln.

Die Lösung des dynamischen Flugproblemes wird eine der größten Errungenschaften der menschlichen Arbeit sein und einen weiten Ausblick eröffnen auf eine epochale Umgestaltung der Zukunft.

Mit den Aufgaben des Fluges beschäftigen sich seit Jahren zahlreiche flugtechnische Vereine und manches Nützliche wird geleistet, aber die große Mehrheit der Ingenieure und Techniker hält sich der Sache fern, und sowohl auf wissenschaftlichem als auch auf praktisch-constructivem Gebiete wird im großem und ganzen sehr wenig gearbeitet. Der Autor, welcher auf seine diesbezügliche 25jährige zeit- und geldraubende, mühevolle Thätigkeit hinweisen kann,* will mit diesem Aufsatze — einem Auszuge aus einem größeren Werke über dynamischen Flug, den er in kommender Zeit veröffentlichen will — in weiteren Kreisen aufklärend und anregend wirken, damit neue Freunde und Mitarbeiter für die schöne Sache gewonnen werden.

Neben einer allgemeinen Übersicht über das Wesen des Fluges und über die dabei herrschenden Grundgesetze enthält die Schrift einen Beitrag über die Theorie des Luftwiderstandes gewölbter Flächen und eine Reihe von Lichtbildern aus einem Apparate zur Sichtbarmachung der Fadenlinien in der bewegten Luft.

---

* An Schriften des Autors seien angeführt:

„Über die Möglichkeit der Luftschiffahrt." Broschüre, Brünn 1880.

Aufsatz hierüber: Technische Blätter. Prag 1876.

In der Zeitschrift für Luftschiffahrt:

- „Die Ausführbarkeit dynamischer Flugmaschinen." 1891, Heft 3, 4, 10; 1892, Heft 3.
- „Über die Stabilität und Steuerung dynam. Flugmaschinen." 1893, Heft 3, 4.
- „Versuche über den Luftwiderstand gewölbter Flächen im Winde und auf Eisenbahnen." 1893, Heft 4.
- „Die Segelradflugmaschine." 1894, Heft 3, 4.
- „Über den Weg zur Herstellung brauchbarer Flugmaschinen." 1896, Heft 8, 9.
- „Versuche mit größeren Luftschrauben." 1897, Heft 4.

In der Zeitschrift des österr. Ingenieur- und Architektenvereines:

- „Luftwiderstand gewölbter Flächen." 1893, Heft 25—28.
- „Über Segelradflugmaschinen." 1893, Heft 50.
- „Luftschraubenversuche." 1894, Heft 33, 34, 47.
- „Segelradversuche." 1894, Heft 50, 51.
- „Versuche mit größeren Luftschrauben." 1896, Heft 35, 36.

Das Schweben und Fliegen.

Damit ein Körper, dessen specifisches Gewicht größer ist als dasjenige der Luft, im Luftraume schwebend oder fliegend erhalten bleibe, muss die Schwerkraft desselben aufgehoben oder besiegt werden.

Zu diesem Zwecke führen zwei Methoden, welche scharf gesondert, unter Umständen jedoch auch gemeinschaftlich angewendet werden können und zwar:

1. Die statische Methode, welche darin besteht, dass man den schweren Körper mit einem specifisch leichten, in einer dünnen Stoffhülle eingeschlossenen Gase in Verbindung setzt, damit er mitsammt der Stoffhülle und dem Gasinhalte nur so schwer sei, wie das Gewicht des verdrängten Luftkörpers und hiedurch ein statisches Gleichgewicht hergestellt werde. Mit den Ausführungen dieser Art beschäftigt sich die Ballontechnik oder Aëronautik.

2. Die dynamische Methode, wobei der schwere Körper mit Tragflächen versehen wird, gegen welche eine äußere Kraft, dem Gewichte entgegenwirkend, ein dynamisches Gleichgewicht erzeugen soll. Diese äußere Kraft kann entweder (ausnahmsweise) unmittelbar einer natürlichen Luftströmung entnommen, oder aber mittels einer durch motorische Arbeit künstlich geschaffenen Luftbewegung hervorgerufen sein. Mit dieser Gattung von Luftfahrzeugen beschäftigt sich die dynamische Flugtechnik oder Aviatik.

Der Luftballon und die Aëronautik.

Die Idee und Erscheinung des Luftballons ist schon über 100 Jahre alt.

Im wesentlichen eine Riesenblase darstellend, steigt der Ballon vermöge seiner specifisch leichten Gasfüllung in die freie Luft empor, trägt, wenn er nur groß und leicht genug ist, auch schwere Lasten mit in die Höhe und schwimmt im Luftmeere, gewissermaßen ein Stück desselben, an Stelle des von ihm verdrängten Luftkörpers.

Die Ballontechnik hat große praktische Fortschritte aufzuweisen; sie wird für militärische Zwecke und für meteorologisch-wissenschaftliche Aufgaben durch reiche Mittel gefördert, und wiewohl die Ballons wegen der ungeheuerlichen Größenverhältnisse ihrer Körper und wegen der Schwäche ihrer Hüllen nur eine sehr beschränkte Eignung für den freien lenkbaren Flug besitzen, so kann sich die Ballonaëronautik dennoch rühmen, dass sie ein sicheres Emporsteigen in hohe Luftregionen thatsächlich bewerkstelligt, während es der in der neueren Zeit aufstrebenden Flugtechnik bisher nicht gelungen ist, ein wirklich brauchbares Flugfahrzeug hervorzubringen.

In Betreff der Tragfähigkeit erscheint für die Luftballons am zweckmäßigsten die Kugelform, welche bekanntlich bei kleinster Oberfläche den größten Rauminhalt bietet und wegen ihrer allseitigen Gleichartigkeit dem Ausgleiche der Gasspannungen, sowie den Festigkeitsverhältnissen am besten entspricht. Aus diesem Grunde sind unter den Ausführungen die Kugelballons am zahlreichsten vertreten; sie werden zumeist ohne Motor und ohne Steuervorrichtung gebaut, so dass ihr Flug dem launenhaften Spiele der Windströmungen anheim gegeben ist.

Außerdem gibt es sogenannte Spitzballons mit Motorbetrieb, welche mit ihrer Spitzkugelform die Luft beim Vorwärtsfluge besser durchschneiden und zur Erzielung einer gewissen Lenkbarkeit und Selbständigkeit mit einer kraftgebenden Maschine und einem Treibapparate ausgerüstet sind; auch auf diesem Gebiete wurde unbestreitbar Hervorragendes geleistet, wofür die Namen der Constructeure (unter anderen: Giffard 1869, Renard und Krebs 1884/85, Graf Zeppelin 1899) bürgen; es wurden auch schon bei Windstille Fluggeschwindigkeiten von 4 bis 6 m in der Secunde zuwegegebracht, aber trotz allen Scharfsinnes und der Geldsummen, die für die Bauart und Herstellung solcher Spitzballons aufgewendet werden, muss es leider voraussichtlich stets ein fruchtloses Beginnen bleiben, mit den schwächlichen Riesenleibern dieser Ungethüme gegen schärfere Winde siegreich ankämpfen zu wollen.

Nennen wir:

J den Rauminhalt des Ballons in m^3,

γ_1 das Gewicht von 1 m^3 Gasfüllung,

γ_0 das Gewicht von 1 m^3 äußerer Luft,

O die Oberfläche des Ballons in m^2,

q das auf 1 m^2 Oberfläche sammt Netzwerk entfallende Gewicht in kg,

Q_1 das Gewicht der Seile, der Gondel mit Ausrüstung und Ballast,

Q die nutzbare Nettotragkraft in kg,

so lautet die Bedingung für das Schwebegleichgewicht:

Das verdrängte Luftgewicht $= J\gamma_0 = J\gamma_1 + Oq + Q + Q_1 =$ dem totalen Ballongewicht.

Setzen wir als runde Mittelwerte für Luft: $\gamma_0 = 1{\cdot}2$, für Leuchtgasfüllung $\gamma_1 = 0{\cdot}6$, für Wasserstoffgasfüllung $\gamma_1 = 0{\cdot}1\ kg$, so liefert je 1 m^3 Balloninhalt die Bruttotragkraft $\gamma_0 - \gamma_1 = 0{\cdot}6$, beziehungsweise $1{\cdot}1\ kg$.

Der Arbeitsbedarf für einen Flug mit der Geschwindigkeit v^{m} bei Windstille in effectiven Pferdestärken beträgt:

$$\frac{aFv^3\gamma}{75\,g},$$

worin F die Ballonquerschnittsfläche, a den der Spitzform entsprechenden Reductionsfactor und g die Beschleunigung der Schwere bedeutet.

Wie man die Sache auch anfassen möge, immer stößt man auf das Missverhältniss zwischen den übermäßig hoch anwachsenden, die Festigkeit nicht erhöhenden Dimensionen des Ballonkörpers und einer immer noch viel zu kleinen Arbeitskraft des mitgenommenen Motors.

Diesen Umständen gegenüber zeigen die dynamischen Flugmaschinen weit günstigere Aussichten für einen sicheren und raschen Flug. Die Aufgabe des Indiehöhekommens ist zwar noch nicht praktisch gelöst, aber sobald dies gelungen wäre (— so fühlt es der fachmännische Flugtechniker —), würden die wichtigen Fragen der Lenkung, Steuerung und raschen Fahrt in der Luft, selbst Winden gegenüber, in sehr kurzer Zeit und in befriedigender Weise gelöst sein.

In dieser Beziehung ist ein scharfer Gegensatz zwischen der statischen und der dynamischen Flugmethode zu beobachten. Während die Ballons sicher und gut in die Höhe steigen und schweben, aber der freien Beweglichkeit und Raschheit entbehren, würden die Flugmaschinen die letzteren Eigenschaften kaum vermissen lassen, wenn nur erst die Hebung in die Luft und das Schwebendbleiben in derselben erreicht wäre.

Die nachfolgenden Untersuchungen werden sich fortan nur mit der Klarlegung der Aufgaben und Ziele des dynamischen Flugproblems beschäftigen.

Bedingungen für den dynamischen Flug.

Zwei Kräfte sind es, welche eine dynamische Flugmaschine bei horizontalem Vorwärtsfluge zu bewältigen hat und zwar:

1. die Schwerkraft des Luftfahrzeuges: G,
2. den horizontalen Stirnwiderstand, welchen das Luftmedium der Fahrt entgegensetzt: S.

Damit ein Körpergewicht G in freier Luft in gleichbleibender Höhe schwebend erhalten bleibe, ist es nothwendig, dass eine demselben gleichgroße nach oben gerichtete Kraft, eine Hebekraft oder ein Auftrieb: H vorhanden sei.

$$\text{Für } H \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} G \quad \begin{matrix} \text{steigt} \\ \text{schwebt} \\ \text{sinkt} \end{matrix} \text{ der Apparat}$$

Zum Behufe des Vorwärtsfluges muss außerdem eine dem Stirnwiderstande des Fahrzeuges S entgegenwirkende, horizontal vorwärtswirkende treibende Kraft, ein Vortrieb: T erzeugt werden.

$$\text{Für } T \begin{matrix} > \\ = \\ < \end{matrix} S \text{ ist der Vorwärtsflug } \begin{matrix} \text{beschleunigt,} \\ \text{gleichförmig,} \\ \text{verzögert.} \end{matrix}$$

Dem stetigen Beharrungszustande einer horizontalen Luftfahrt entsprechen somit die Bedingungen:

$G = H$ oder: Schwere = Auftrieb,

$S = T$ oder: Stirnwiderstand = Vortrieb.

Sowohl der Auftrieb als der Vortrieb sind Kräfte, welche durch die Wirkung der Luft hervorgerufen, welche aus dem Widerstande der Luft selbst genommen werden müssen, weil sich beim freien Fluge kein anderes Hilfsmittel als Stütze bietet.

Ein Luftwiderstand, das ist ein dynamischer Druck (Abstoß, Reaction, Repulsion) verdichteter Luft ist überhaupt nur möglich, wenn Flügelflächen und Luftbewegung vorhanden sind. Es ist also unbedingt nothwendig, dass ein brauchbares Luftfahrzeug mit Flügelflächen ausgestattet sei und dass außerdem (wenn man vom natürlichen Winde absieht, weil dieser nur zeitweilig weht und nur unter den günstigsten Umständen ausnahmsweise einen genügenden Auftrieb und Vortrieb zu erzeugen vermag) durch Bewegung dieser Flügelflächen eine Luftströmung, eine Art künstlichen Windes geschaffen werde.

Zur Besorgung der künstlichen Flächen- und Luftbewegung braucht man eine motorische Arbeitskraft; das Luftschiff wird zu einer dynamischen Flugmaschine.

Von Flügelflächen, welche im allgemeinen eine geradlinige, schwingende oder im Kreise umlaufende Bewegung besitzen, ferner einzelweise, oder in Gruppen nebeneinander, hintereinander und übereinander vorkommen können, unterscheidet man bei Flugapparaten gewöhnlich zweierlei Gattungen:

1. Tragflächen zur Erzeugung des Auftriebes, welche manchmal eine separate Bewegung besitzen, oder aber mit dem Gerüste des Fahrzeuges in fester Verbindung stehend an der Bewegung des Fahrzeuges theilnehmen, folglich nur während des Vorwärtsfluges tragen, beim Stillstande jedoch wirkungslos sind.

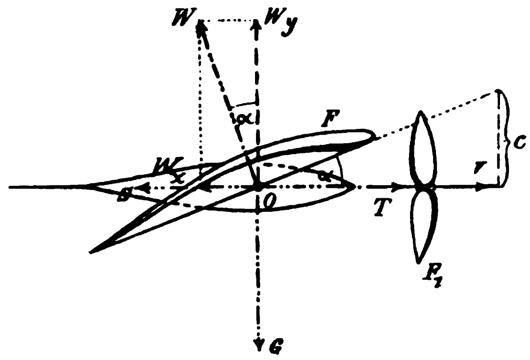
2. Treibflächen zur Erzeugung des Vortriebes, welche zumeist als umlaufende Schraubenflügelräder (Luftpropeller) angeordnet werden; es ist jedoch nicht ausgeschlossen, dass auch nur eine Sorte von Flächen sowohl dem Auftriebe als dem Vortriebe zu dienen bestimmt ist, wie z. B. die schwingenden Flügelflächen des Vogels, welche ihn tragen und gleichzeitig vorwärtstreiben.

Das einfache Beispiel eines sogenannten Drachenfliegers (Fig. 1) soll dazu dienen, um daran die Bedingungen des horizontalen Schwebefluges bei Windstille, sowie den Bedarf an motorischer Arbeit zu erläutern. Zur Erleichterung der Rechnung möge angenommen werden, dass der Angriffspunkt aller wirksamen Kräfte gemeinschaftlich sei und mit dem Schwerpunkte 0 des Luftfahrzeuges zusammenfalle.*

* In Wirklichkeit wird das nicht der Fall sein und müssten daher zum Behufe der erforderlichen Sicherheit des Fluges gegenüber den auftretenden, verschiedenartig wechselnden Drehmomenten und Störungen entsprechende Vorkehrungen getroffen sein.

Die Schwerkraft G zieht den Körper nach unten; der Stirnwiderstand S wirkt horizontal der nach rechts gehenden Flugrichtung entgegen; irgend eine schräge Tragfläche F liefere einen schief nach oben rückwärts unter dem Winkel α gegen die Verticale geneigten Luftwiderstand W; eine Treibfläche F' schaffe die horizontal vortreibende Kraft T; die Fluggeschwindigkeit sei v geheißen.

Fig. 1.



Damit eine gleichförmige Vorwärtsbewegung unter stetigem Beharrungszustande möglich sei, müssen alle Kräfte, nämlich G, S, W und T, im Gleichgewichte stehen; die Verticalcomponente des geweckten Luftwiderstandes $Wy = W\cos\alpha$ muss dem Gewichte G gleichkommen; die vortreibende Kraft T hat sowohl die Horizontalcomponente des Luftwiderstandes $W_x = W\sin\alpha$ als auch den Stirnwiderstand S zu bewältigen. Die Bedingungsgleichungen für den horizontalen Schwebeflug lauten:

$$W_y = W\cos\alpha = G,$$
$$W_x + S = W\sin\alpha + S = T,$$

ferner gilt die Beziehung

$$\frac{W_x}{W_y} = \frac{W\sin\alpha}{W\cos\alpha} = \operatorname{tg}\alpha.$$

Der von den Treibflächen F' zu liefernde Arbeitseffect in Secundenmeterkilogrammen: $A = Tv = (W\sin\alpha + S)v$ lässt sich in zwei Theile zerlegen, nämlich:

1. in die Schwebe- oder Auftriebsarbeit: $A_1 = W\sin\alpha\, v$, welche zur Schaffung des Auftriebes, also dem Tragen der Last G dient, und

2. in die Vortriebsarbeit: $A_2 = Sv$, welcher die Bewältigung des Stirnwiderstandes S obliegt.

In der Regel pflegt bei dynamischen Flugmaschinen der weitaus größere Antheil auf die Auftriebsarbeit verwendet zu werden, weil der Stirnwiderstand des Luftschiffes, zumal bei langsamer Flugbewegung, verhältnismäßig klein ist.

Für das Schweben eines Luftfahrzeuges in freier Luft an Ort und Stelle ohne Vorwärtsflug (in welchem Falle die Treibfläche F' entfallen kann und, wie das z. B. bei tragenden Luftschrauben geschieht, mehrere Schrägflächen F

um eine verticale Drehachse im Kreise herumbewegt werden) verschwindet der Stirnwiderstand S gänzlich, ebenso der Bedarf an Vortriebsarbeit $A_2 = Sv$, die vortreibende Wirkung T beschränkt sich auf die Behebung der horizontalen Luftwiderstandscomponente $W_x = W \sin\alpha$, und die Gesammtarbeit, welche dann Auftriebsarbeit allein ist, hat den Ausdruck:

$$A = W_x v = W_y v \operatorname{tg}\alpha = G v \operatorname{tg}\alpha \quad \ldots \ldots \ldots 1)$$

In den unmittelbar nachfolgenden Betrachtungen sei denn auch vorläufig der Stirnwiderstand des vorwärtsfliegenden Luftschiffkörpers S außerachtgelassen und nur der wichtige Betrag an reiner Schwebearbeit in Rechnung gezogen.

Die Auftriebsarbeit nach Gleichung 1) $A = G v \operatorname{tg}\alpha$ erscheint in ihrer Form als das Product von Kraft und Weg (G und $v \operatorname{tg}\alpha$), somit als eine Hebungsarbeit, welche das Gewicht G des Flugfahrzeuges in jeder Secunde auf eine Höhe $v \operatorname{tg}\alpha$ zu heben imstande wäre. Die Größe $v \operatorname{tg}\alpha$ (in der Figur 1 durch die Dreieckskathete $C = v \operatorname{tg}\alpha$ dargestellt) ist als eine ideelle secundliche Hebungshöhe der in der Luft getragenen Last aufzufassen, welcher die aufgewendete Arbeitsleistung zum Zwecke des Schwebenderhaltens genügen muss, oder auch als eine ideelle Fallgeschwindigkeit, um welche das Gewicht des Fahrzeuges beim Vorwärtsfluge heruntersinken würde, wenn kein Motor da wäre.

Maßgebend und von großer Bedeutung für die Ausführbarkeit dynamischer Flugmaschinen sind vornehmlich 2 Quotienten:

1. $$\frac{G}{F} = \frac{\text{Gewicht des Luftschiffes in } kg}{\text{Flügelfläche desselben in } m^2}.$$

Es ist das nichts anderes, als die auf eine Flächeneinheit der Flügel entfallende Auftriebskraft oder die specifische Tragfähigkeit des Luftfahrzeuges.*

Der reciproke Ausdruck $\frac{F}{G}$ stellt die für jedes Kilogramm des in Schwebe zu erhaltenden Gewichtes erforderliche Flächendimension dar. Kleinere Flügelabmessungen, welche für den gleichen Effect naturgemäß höhere Bewegungsgeschwindigkeiten verlangen, entsprechen einem großen $\frac{G}{F}$, beziehungsweise einem kleinen $\frac{F}{G}$.

2. $$\frac{A}{G} = \frac{\text{Erforderlicher Arbeitsaufwand in } smkg}{\text{In Schwebe gehaltenes Luftschiffgewicht in } kg}.$$

Es ist das die auf eine Gewichtseinheit entfallende motorische Arbeitskraft oder die specifische Leistungsfähigkeit des Luftfahrzeuges.**

* Die specifische Tragfähigkeit der Vögel $\frac{G}{F} = \frac{\text{Vogelgewicht}}{\text{Flügelfläche}}$ schwankt zwischen 4 und 9, und zwar sind die größeren Werte, beziehungsweise die relativ kleineren Flügelflächen den besseren und schnelleren Fliegern eigen.

** Bei den Vögeln pflegt man anzunehmen: $\frac{A}{G} = \frac{\text{Arbeitskraft}}{\text{Vogelgewicht}} = 0{\cdot}8$ bis $2{\cdot}2$, doch ist die Bestimmung der Muskelthätigkeit in den Flügeln durchaus nicht sicherstehend.

Der reciproke Wert $\frac{G}{A}$ gibt jenes Gewicht an, welches durch die Einheit der secundlich ausgeübten Arbeit getragen oder in Schwebe erhalten wird und liefert einen Anhaltspunkt für die Arbeitsökonomie der Luftfahrt. Je kleiner $\frac{A}{G}$, je größer $\frac{G}{A}$, desto günstiger und vortheilhafter wird der Flug.

Wenn man den Arbeitseffect in Maschinenpferden rechnet, hat man, da 1 Pferd mit 75 *smkg* mechanischer Arbeit äquivalent ist, die Umwandlungsformel zu benützen:

$$75\, N^{HP} = A^{smkg}.$$

In Verfolg des anzustrebenden Zieles handelt es sich um die Aufgabe, mit möglichst wenig Arbeitsaufwand A und mit möglichst kleinen Flügelflächen F einen möglichst großen, das Gewicht G tragenden Auftrieb hervorzubringen.

Dabei muss aufmerksam gemacht und mit allem Nachdruck betont werden, dass die Arbeitsleistung, welche zur Bewegung von Flügelflächen aufgewendet wird, nicht unmittelbar in Auftrieb verwandelt werden kann; denn Arbeit und Kraft sind zwei ungleichwertige Dinge; Arbeit setzt sich immer wieder nur in Arbeit um, hier die Flügelbewegungsarbeit in kinetische Energie bewegter Luft, also in Luftbewegungsarbeit, und der dabei geweckte Luftwiderstand oder der dynamische Luftdruck gegen die Flügelflächen, welchen wir für die Flugzwecke brauchen und nutzbar machen wollen, ist nur eine begleitende Nebenerscheinung des sich abspielenden Arbeitsprocesses.

Damit die unvermeidlich erzeugte Luftbewegung möglichst vollkommen zur Gewinnung von Auftriebskraft ausgenutzt werde, soll insbesondere jede Beunruhigung der unwirksamen Außenluft thunlichst vermieden werden, denn jeder nutzlos erzeugten Luftbewegung entspricht ein Betrag an nutzlos verrichteter Arbeit.

Hiernach wird es erklärlich, dass die elastische Flügelschwingung mit ihrem stoßfreien, sanft abschließenden Hubwechsel, deren sich die Vögel beim Fluge bedienen, so außerordentlich günstige Effecte liefert.

Die Gesetze des Luftwiderstandes.

Ein von ruhender Luft umgebener ruhender Körper empfängt an seiner Oberfläche einen gegen dieselbe gerichteten, wie bekannt, sehr bedeutenden überall gleich großen statischen Luftdruck.* Wenn dagegen der Körper, oder die Luft, oder beide in Bewegung sind, entsteht an seiner Oberfläche eine Veränderung in der Anordnung und Bewegung der Lufttheilchen; die Vertheilung des Luftdruckes wird ungleichartig und das Mehr desselben auf der Vorderseite

* Die atmosphärische Pressung beträgt bei normalen Luftverhältnissen und 760 *mm* Barometerstand 10334 *kg* auf 1 m^2.

gegenüber dem Weniger auf der Rückseite verursacht eine gegen den Körper nach einer bestimmten Richtung wirkende Kraft, welche wir den **dynamischen Luftdruck** oder **Luftwiderstand** nennen.

Als Begleiterscheinungen des Vorganges sind aufzuzählen: Das seitliche Ausweichen der Luft vor dem verdrängenden Körper und das Zusammenströmen der Luft in den hinter demselben freiwerdenden Raum, wechselnde Spannungen, Verdichtungen und Verdünnungen, Geschwindigkeitsänderungen in dem umgebenden Luftkörper, Wellenbildungen, die sich nach außen hin ausbreiten, Wirbel verschiedener Art, sowie dadurch hervorgerufene Temparaturschwankungen. Eine dünne Haut von Luft, welche sich unter Umständen vorn zu einem angestauten Luftpolster, rückwärts zu einem nachgesaugten Luftsack erweitern kann, bleibt an der Körperoberfläche haften, so dass die auftretende Luftreibung nicht zwischen Luft und Körper, sondern zwischen Luft und Luft, nämlich zwischen den äußeren Luftschichten und der den Körper begleitenden Luft vor sich geht. Dabei wird die Cohäsion der mit ungleicher Geschwindigkeit aneinander vorbei gehender Lufttheilchen fortwährenden Störungen unterworfen. Ein stetig herrschender dynamischer Beharrungszustand ist ganz unmöglich.

Für die Erscheinungen des Luftwiderstandes ist es principiell gleichgiltig, ob der Körper sich in ruhender Luft, oder ob die Luft in paralellen Fäden sich gegen den ruhenden Körper, oder ob sich beide zugleich bewegen, denn entscheidend ist nur die relative Geschwindigkeit der zwei zusammentreffenden Körper.*

Eine theoretische Umkehrbarkeit des Processes ist immer vorhanden und die oft bedeutenden Divergenzen zwischen den bei bewegten Flächen in ruhender Luft und bei ruhenden Flächen in bewegter Luft gefundenen Erfahrungscoëfficienten sind darauf zurückzuführen, dass bei den einschlägigen Versuchen Unregelmäßigkeiten in der Bewegungsart kaum zu vermeiden sind.

Aus dem Gesagten geht ohneweiters hervor, dass die Untersuchungen über die **allgemeine Theorie des Luftwiderstandes** große Schwierigkeiten aufweisen müssen, wie das unter anderem bei der Behandlung ballistischer Probleme deutlich zutage tritt.

Gehört schon die **Theorie des Wasserwiderstandes** trotz ihrer für die Schiffahrt so bedeutenden Wichtigkeit und trotz der zahllosen Experimente auf diesem Gebiete zu den am wenigsten klargestellten Partien der Hydraulik, darf es uns nicht Wunder nehmen, dass auch die Theorie des Luftwiderstandes

---

* Wenn sich der Körper mit der Geschwindigkeit c und der Wind in derselben Richtung mit der kleineren Geschwindigkeit ω bewegt, so ist für die Bildung des Luftwiderstandes nur die Differenz $v = c - \omega$ maßgebend. Genau derselbe Luftwiderstand würde erzeugt werden, wenn die Luft ruhig und der Körper sich mit v vorwärtsbewegen oder wenn der Körper ruhend und der Wind mit v dagegen strömen möchte. Falls der Wind dem bewegten Körper entgegenbläst, ist die relative Geschwindigkeit gleich der Geschwindigkeitssumme: $c - (-\omega) = c + \omega$. Fliegen Körper und Wind gleich schnell miteinander, so herrscht relative Ruhe. Der Balloninsasse spürt z. B. nicht den Wind, mit welchem der Ballon weitergeht.

noch unvollkommen geblieben ist, zumal wir es da mit einem elastisch nachgiebigen, in seiner Dichte und Spannung veränderlichen Stoffe zu thun haben.

In den Arbeiten, welche sich mit den vorliegenden Aufgaben des Luftwiderstandes beschäftigen, finden wir häufig die sogenannte Stauhügeltheorie und die Fadenlinientheorie als einander widerstreitend dargestellt, was aber durchaus nicht begründet ist, weil beide Theorien ihre Berechtigung haben und im vollen Einklange nebeneinander bestehen können.

In derlei Zweifelfällen ist es am besten, zu anschaulichen Bildern und zu praktischen Proben Zuflucht zu nehmen, und hat der Autor deshalb den am Schlusse des Aufsatzes vorgeführtem Apparat construirt, um die Luftbewegungen längs der Widerstand gebenden Körper und Flächen wahrnehmbar zu machen.

Für den vorgesteckten Zweck der Abhandlung genügt es, weil nur mäßige Geschwindigkeiten, regelmäßige Bewegungen und einfache Flächenformen in Betracht kommen, den dynamischen Gesetzen gemäß die **allgemeine Formel für den Luftwiderstand** anzusetzen:

$$W = aF\frac{\gamma}{g}v^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 2)$$

Hierin bedeutet:

F die Querschnittsfläche des die Luft verdrängenden Körpers in m^2,

a einen Factor, welcher von der Form, Bauart und Oberflächenbeschaffenheit des Körpers abhängt,

γ das specifische Gewicht der Luft $= 1$ bis $1{\cdot}3\,kg$ per m^3,

g die Acceleration der Schwere, für Metermaß $= 9{\cdot}808$, so dass für mittlere Verhältnisse bei $\gamma = 1{\cdot}226\ \frac{\gamma}{g} = \frac{1}{8}$ ist, und

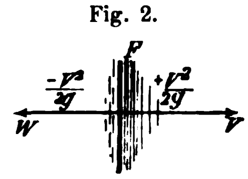
v die Bewegungsgeschwindigkeit der Körper gegeneinander in sm.

Die Grundformel besagt: **Der durch die Bewegung verursachte Luftwiderstand ist der verdrängenden Querschnittsfläche, der Luftdichte und dem Quadrate der relativen Geschwindigkeit proportional.**

Luftwiderstand ebener Flächen.

Der einfachste Fall des Luftwiderstandes ist der, dass eine ebene Fläche **enkrecht** mit der Luft zusammentrifft (Figur 2).

Fig. 2.



Vor der Fläche entsteht eine Verdichtung, entsprechend einer Luftsäulenmanometerhöhe $+\frac{v^2}{2g}$, hinter der Fläche eine Verdünnung, entsprechend $-\frac{v^2}{2g}$; die Spannungsdifferenz zu beiden Seiten der Fläche beträgt:

$\frac{v^2}{2g} - \left(-\frac{v^2}{2g}\right) = \frac{v^2}{g}$, folglich der geweckte Luftwiderstand, welcher der Bewegungsrichtung entgegenwirkt:

$$W = F\frac{\gamma}{g}v^2 \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 3)$$

Der Factor der allgemeinen Gleichung 2) ist hier $a = 1$.

Der secundliche Arbeitsbedarf zur Vorbewegung der Fläche, beziehungsweise zur Überwindung des Luftwiderstandes, ist:

$$A = Wv = F\frac{\gamma}{g}v^3 \quad \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 4)$$

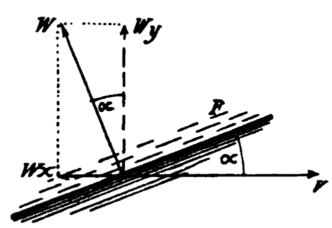
und erscheint geradeso groß, wie jene lebendige Kraft, welche einerseits zum Wegdrücken des verdrängten vorderen Luftgewichtes $Fv\gamma$ und anderseits zum Nachsaugen eines hinteren Luftgewichtes $Fv\gamma$ mit der Geschwindigkeit v erforderlich wäre; es ist nämlich: $Fv\gamma \cdot \frac{v^2}{2g} \cdot 2 = F\frac{\gamma}{g}v^3 = A$, wie oben.

Der senkrechte Luftwiderstand von 1 m^2 Fläche ergibt sich:

$$\frac{W}{F} = \frac{\gamma}{g}v^2,$$

also beispielsweise für $\gamma = 1{\cdot}226$; $g:\gamma = 8$; $v = 12\ sm$; $W:F = 18\ kg$.

Fig. 3.



Eine ebene Schrägfläche F, Figur 3, unter den Elevationswinkel α eingestellt und horizontal mit einer Geschwindigkeit v gegen ruhende Luft bewegt, erzeugt einen senkrecht gegen die Fläche gerichteten Luftwiderstand:

$$W = F\frac{\gamma}{g}v^2 \sin\alpha \quad \ldots \ldots \quad 5)$$

Die Verticalcomponente dieser Kraft:

$$W_y = W\cos\alpha = F\frac{\gamma}{g}v^2 \sin\alpha \cos\alpha \quad \ldots \ldots \ldots \quad 6)$$

erreicht ihren größten Wert, wenn $\sin\alpha\cos\alpha$ ein Maximum wird, das ist für $\alpha = 45^0$, $\sin\alpha = \cos\alpha = 0{\cdot}707$; dann ist $Wy\,\text{max.} = 0{\cdot}5\,F\frac{\gamma}{g}v^2$.

Die Horizontalcomponente wirkt der Bewegung hemmend entgegen und hat die Formel:

$$Wx = W\sin\alpha = F\frac{\gamma}{g}v^2 \sin^2\alpha \quad \ldots \ldots \ldots \quad 7)$$

Ihr Maximalwert entspricht der vollsenkrechten Flächenbewegung für $\alpha = 90^0$, $\sin\alpha = 1$; es ist $Wx\,\text{max.} = F\frac{\gamma}{g}v^2$.

Der Factor der allgemeinen Gleichung 2) ist hier $a = \sin\alpha$.

Die zur Vorwärtsbewegung der Schrägfläche erforderliche Arbeitsgröße lautet:

$$A = Wx \cdot v = F\frac{\gamma}{g}v^3 \sin^2\alpha \ldots \ldots \ldots \ldots \quad 8)$$

Die Richtigkeit obiger Gleichungen 2 bis 8 ist durch die hydrodynamischen Grundgesetze begründet und durch zahlreiche Versuche bewiesen.*

---

* Siehe: v. Lössl, „Die Luftwiderstandsgesetze". Wien 1896, S. 97 u. f.; dann F. Fink, Civilingenieur, 1892, S. 635: „Über Wasserwiderstand von Schrägflächen."

Das Verhältnis der Arbeitsgröße (8) gegenüber der Verticalcomponente des Luftwiderstandes (6), welche als eine erzeugte Auftriebskraft gelten kann, ist gegeben durch den Ausdruck:

$$\frac{A}{Wy} = v\frac{Wx}{Wy} = v \operatorname{tg}\alpha \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 9)$$

welchen wir schon bei Besprechung des gewählten Beispieles, Figur 1, als die specifische Leistungsfähigkeit eines Luftfahrzeuges kennen gelernt haben.

Je kleiner die Geschwindigkeit v und die Tangente des Elevationswinkels α der Schrägfläche, desto geringer ist der für die Schaffung eines Auftriebes Wy nothwendige Arbeitsaufwand A.

Es lassen sich jedoch auch größere Geschwindigkeiten v verwenden, ohne den Quotienten $\frac{A}{Wy}$ erhöhen zu müssen, wenn man den Schrägwinkel α in entsprechender Weise kleiner wählt.

Der Auftrieb für je 1 m^2 Schrägfläche ergibt sich aus der Gleichung 6):

$$\frac{Wy}{F} = \frac{\gamma}{g} v^2 \sin\alpha \cos\alpha \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 10)$$

und durch die Verbindung der Formel 9 und 10 folgt weiters unter Elimination der Geschwindigkeit v die Beziehung:

$$\left(\frac{A}{Wy}\right)^2 = \frac{Wy}{F}\,\frac{g}{\gamma}\,\frac{\sin\alpha}{\cos^3\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 11)$$

Die Analyse der vorstehenden Gleichungen liefert vielfache, die Fragen der Flugtechnik berührende Folgerungen, deren Ableitung und eingehende Erörterung aber zu weit aus dem Rahmen dieser Schrift herausführen würde; auf die wichtigsten Sätze wird noch später bei Besprechung der Flugmaschinensysteme hingewiesen werden.

Ein Beispiel möge zur Erläuterung der Formeln dienen.

Die Wahl: $\frac{A}{Wy} = 3$, $\frac{Wy}{F} = 9$, $\frac{g}{\gamma} = 8$, führt auf den Wert: $\frac{\operatorname{tg}\alpha}{\cos^2\alpha} = \frac{1}{8}$, $\alpha = 7^0$ und auf ein zugehöriges $v = 24$ *sm.*

Luftwiderstand von gekrümmten Flächen und Körpern.

Man könnte meinen, es sei zum Zwecke der Ermittelung des Luftwiderstandes irgend welcher gekrümmten Flächen und Körper am besten in der Weise vorzugehen, dass man die ganze der Luft ausgesetzte Oberfläche F_0 in einzelne Flächenstücke $f_1, f_2, f_3 \ldots$, welche die Winkelstellungen $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \ldots$ besitzen mögen, zertheilt, für jedes Flächenstück die Druckkraft im Sinne der Bewegung nach der für Schrägflächen bekannten Formel $\omega_x = f\frac{\gamma}{g}v^2\sin^2\alpha$ ausrechnet und dann die Summierung vornimmt:

$$Wx = \Sigma\,\omega_x = \omega_{x1} + \omega_{x2} + \omega_{x3} + \ldots = \Sigma f\frac{\gamma}{g}v^2\sin^2\alpha =$$

$$= \frac{\gamma}{g}v^2(f_1\sin^2\alpha_1 + f_2\sin^2\alpha_2 + f_3\sin^2\alpha_3 + \ldots\ldots).$$

Diese synthetische Methode ist aber unzulässig und führt auf unrichtige Resultate, weil die Lufttheilchen nicht abgesondert auf jedes einzelne Flächenstück in parallelen Büscheln auffallen, sondern mannigfache, gegenseitig und gemeinschaftlich beeinflusste Ablenkungen erfahren, so dass die Richtungen der zu den Flächenstücken $f_1, f_2, f_3 \ldots$ gelangenden Luftfäden mit den zur allgemeinen Bewegungsrichtung vorhandenen Neigungswinkeln $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3 \ldots$ durchaus nicht übereinstimmen. Es kann z. B. das Oberflächenstück f_2 eines die Luft verdrängenden Körpers senkrecht zur Bewegungsrichtung stehen, ohne von der Luft auch wirklich senkrecht getroffen zu werden, weil ein anderes, weiter vorn stehendes Flächenstück f_1 die heranrückenden Lufttheilchen inzwischen nach irgend einer schiefen Richtung krummlinig abgelenkt hat.

An einigen durch Experimente sichergestellten Luftwiderstandswerten symmetrischer Flächenformen sei dies erläutert.

Es heiße:

F_0 die der Luftströmung ausgesetzte vordere Oberfläche des Körpers,

F die Querschnittsfläche oder Projection von F_0 auf eine zur Bewegungsrichtung senkrechte Ebene,

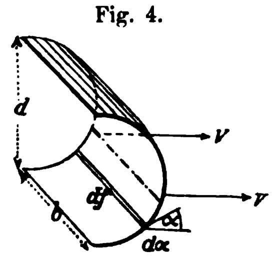
$f = aF$ eine ideelle ebene Fläche, welche bei senkrechter Bewegung den gleichen Luftwiderstand äußern würde, wie der Körper; a ist der Reductionsfactor oder Zuschärfungscoëfficient, welcher immer kleiner als 1 sein muss;

f' den falschen Äquivalentenwert, welcher aus der Summierung der theoretischen Wirkungen der Theilflächen hervorgehen würde,

endlich:

$W = aFv^2 \frac{\gamma}{g}$ der erzeugte Luftwiderstand.

Fig. 4.



Für einen Halbcylinder (Fig. 4), welcher mit der convexen Seite vorwärtsbewegt wird, ist, wenn der Durchmesser d, die Breite b heißt, $F_0 = \frac{\pi}{2} db$, $F = db$, der Reductionsfactor erfahrungsgemäß $a = \frac{2}{3}$, somit:

$$f = aF = \frac{2}{3} db = \frac{2}{3} F = \frac{4}{3\pi} F_0.$$

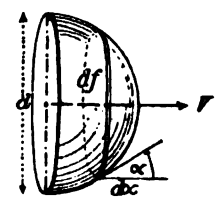
f' entspricht dem Integralausdrucke:

$$f' = \frac{\int d\omega_x}{\frac{\gamma}{g} v^2} = b \frac{d}{2} 2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \alpha \, d\alpha = \frac{\pi}{4} b d = \frac{\pi}{4} F = \frac{1}{2} F_0.$$

Während also die theoretische unrichtige Äquivalentenfläche $f_1 = \frac{1}{2}$ der Mantelfläche, $= \frac{\pi}{4}$ der Basisfläche erscheint, ist die wahre reducierte Fläche nur $f = \frac{4}{3\pi}$ der Mantelfläche, $= \frac{2}{3}$ der Basisfläche; der gemachte Fehler lässt sich darstellen durch das Verhältnis $\frac{f}{f'} = \frac{8}{3\pi}$.

Für eine mit der convexen Seite vorwärtsbewegte Halbkugel vom Durchmesser d, Figur 5, ist:

Fig. 5.



$$F_0 = \frac{\pi}{2} d^2, \quad F = \frac{\pi}{4} d^2, \quad \text{der Reductionsfactor } a = \frac{1}{3},$$

$$f = aF = \frac{\pi}{12} d^2 = \frac{1}{3} F = \frac{1}{6} F_0.$$

Die Integration liefert:

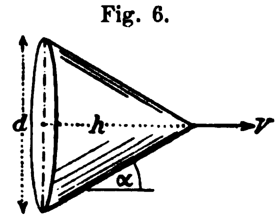
$$f_1 = \frac{\pi}{2} d^2 \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2 \alpha \cos \alpha \, d\alpha = \frac{\pi}{6} d^2 = \frac{2}{3} F = \frac{1}{3} F_0.$$

Die Fehlerhaftigkeit der theoretischen Rechnung beträgt also $\frac{f}{f_1} = \frac{1}{2}$.

Wenn man eine hohle Halbkugel umkehrt und mit der concaven Seite genau senkrecht vorwärtsbewegt, dann ist der erzeugte Luftwiderstand nur ebensogroß, wie derjenige einer ebenen Scheibe gleichen Durchmessers, also eines Kreises $\frac{\pi}{4} d^2 = F$. Ein geringes Schiefstehen ruft sofort ein seitliches Abfließen von Luft und eine Druckabschwächung hervor.

Ein Kegel, Figur 6, mit einem Durchmesser der Basis d, einer Höhe h und dem Kegelwinkel α, welcher axial mit der Spitze vorwärtsbewegt wird, besitzt

Fig. 6.



eine Mantelfläche $F_0 = \frac{\pi}{4} d^2 \frac{1}{\sin \alpha}$,

eine Basisfläche $F = \frac{\pi}{4} d^2$ und

einen Reductionsfactor $a = 0{\cdot}83 \sin \alpha$ (nach Lössl).

Hiernach ist: $f = aF = 0{\cdot}83 \frac{\pi}{4} d^2 \sin \alpha = 0{\cdot}83 \sin \alpha F = 0{\cdot}83 \sin^2 \alpha F_0$,

während $f_1 = \frac{\pi}{4} d^2 \sin \alpha = F \sin \alpha = F_0 \sin^2 \alpha$ wäre.

Der Fehler ist somit hier $\frac{f}{f'} = 0{\cdot}83$.

Eine sehr bedeutende Verringerung des geweckten Luftwiderstandes, folglich auch des Reductionsfactors oder Zuschärfungscoëfficienten a, beziehungsweise ein leichteres Durchschneiden der Luft gewinnt man erfahrungsgemäß, wenn der Kegelmantel nach rückwärts mit sanft convexer Krümmung allmählich in einen Cylinder übergeht, wie das z. B. bei den Spitzkugelformen der Fall ist.

Der Luftwiderstand gewölbter Flächen.

(Beitrag zur Theorie desselben.)

Den Flügeln fast aller Flugthiere ist eine unterhalb concav ausgetiefte und oberhalb convex ausgewölbte Form eigen; selbst die einzelnen Federn des Vogelflügels zeigen diese Gestalt, was im Hinblick auf die bekannte Meisterschaft der Natur in ihren Constructionen als Beweis dienen kann dafür, dass den gewölbten Flächenformen für aërodynamische Zwecke eine hervorragende Bedeutung zukommen muss.

Die von unten an die Muldenhöhlung sich anschmiegende und über dem Bogen des gewölbten Flügels oben hinwegstreichende Luftbewegung ist zwangläufig und krummlinig geführt und weckt als solche eine Fliehkraft nach oben, welche den Auftrieb wesentlich steigern kann.

An einem Beispiele soll versucht werden, die Wirkung auszumitteln.

Die kreisbogenförmig gewölbte Fläche F, Figur 7, sei mit ihrer horizontalen Vorderkante den von links herankommenden Lufttheilchen entgegengestellt.

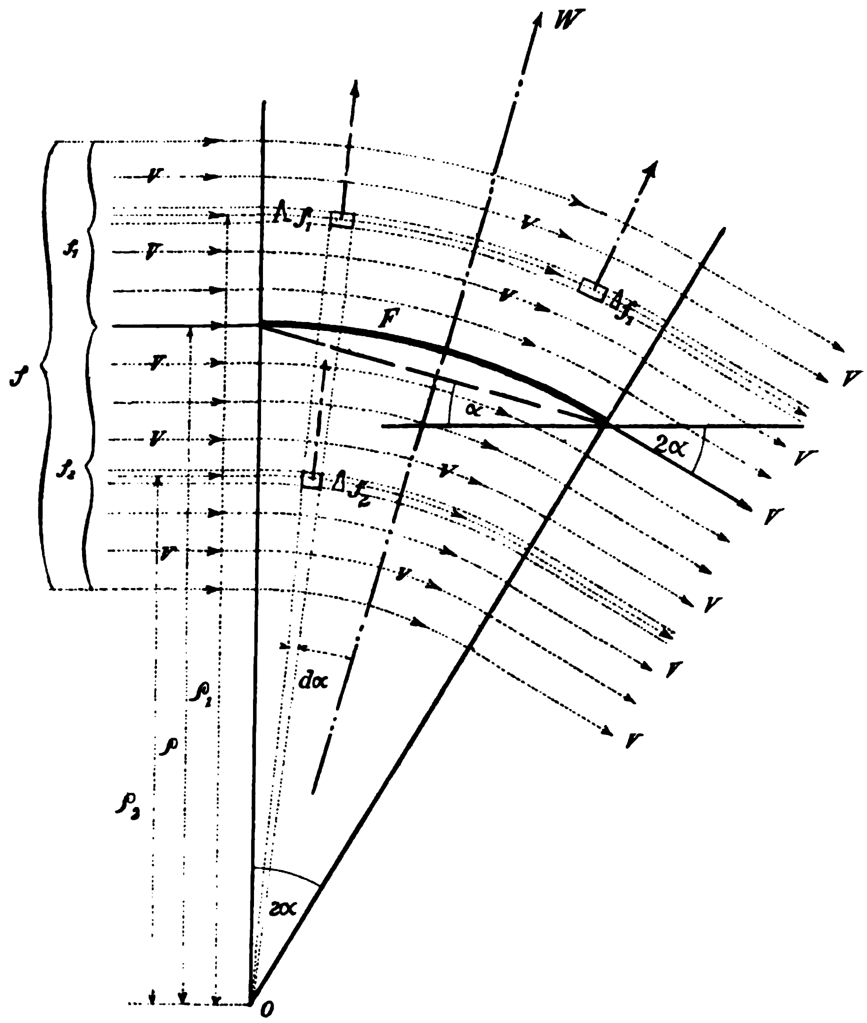
Die Fläche verhält sich im wesentlichen der Luft gegenüber analog, wie ein bogenförmiges Rohr für einen hindurchlaufenden Flüssigkeitsstrom mit dem Unterschiede, dass hier die Führung nicht an einer inneren Rohrmantelfläche, sondern im freien Luftraume längs der zwei Außenseiten einer beiderseits offenen Fläche geschieht.

Wir haben es hier nicht mit einem begrenzten zwangsläufigen Flüssigkeitsstrome zu thun, sondern mit dem unbegrenzten Luftmedium, in welchem sich eine Luftwelle herausbilden wird, deren mittleres Band mit den der gewölbten Fläche nächstliegenden Theilchen längs derselben ziehend die größte Schwingungshöhe und die größte Bogenablenkung erfährt, während die unteren und die oberen Schichten des Luftstriches mit wachsendem Abstande von der führenden Fläche dem Zwange der Krümmung immer mehr und mehr entzogen sind und in den Luftraum hinaus allmählich verflachenden Bahnlinien folgen.

Wir wollen vorerst annehmen, dass die der gewölbten Fläche naheliegenden Lufttheilchen, wie das in der Figur 7 dargestellt ist, mit der Fläche genau concentrische Bahnlinien beschreiben, und die Kraftwirkungen prüfen, welche daraus erwachsen. Zugleich sei vorausgesetzt, dass die Breite der betrachteten Fläche, senkrecht zum Bilde gemessen, ungemein groß sei, dass folglich die Fadenlinienerscheinung in allen zur Bildfläche parallelen Ebenen den gleichen Vorgang einhalte.

Eine sehr kleine Querschnittsfläche Δf des oberhalb der Fläche F streichenden Luftbandes beschreibt den Bogen des Centriwinkels 2α vom Radius ϱ_1 mit der Geschwindigkeit v. Ein Theilstück dieses Luftbandbogens, in der Figur angedeutet, besitzt ein Volumen $\Delta f_1 \varrho_1 d\alpha$, ein Gewicht $\Delta f_1 \varrho_1 d\alpha \gamma$ und liefert eine nach auswärts gerichtete Centrifugalkraft $\Delta f_1 \varrho_1 d\alpha \frac{\gamma}{g} \frac{v^2}{\varrho_1} = \Delta f_1 \frac{\gamma}{g} v^2 d\alpha$. Die Componente davon im Sinne der resultierenden Kraftrichtung W beträgt $d\omega = \Delta f_1 \frac{\gamma}{g} v^2 d\alpha \cos\alpha$, in welchem Ausdrucke der Winkel α als eine variable Größe auftritt; die zweite senkrecht dazu gerichtete Kraftcomponente wird durch eine gleichgroße entgegengesetzt wirkende Componente des im dazu symmetrischen Gegenpunkte gelegenen Luftkörpers $\Delta f_1 \varrho_1 d\alpha \gamma$ (in der Figur rechterhand) aufgehoben, braucht also nicht weiter berücksichtigt zu werden.

Fig. 7.



Die Gesammtwirkung des betrachteten Bogenstreifens im Sinne der Kraft W, die wir $\Delta\omega_1$ heißen wollen, lässt sich durch Integration finden:

$$\Delta\omega_1 = \int_0^{\Delta\omega_1} d\omega = \int_0^{\alpha} 2\,\Delta f_1 \frac{\gamma}{g} v^2 \cos\alpha\, d\alpha = 2\,\Delta f_1 \frac{\gamma}{g} v^2 \int_0^{\alpha} \cos\alpha\, d\alpha = \Delta f_1 \frac{\gamma}{g} v^2\, 2 \sin\alpha.$$

Diese Kraft $\Delta\omega$, das Resultat der Action und Reaction der bogenförmigen Strömung des Luftbandstreifens vom Querschnitt Δf_1 ist vom Mittelpunkte O nach auswärts senkrecht zur Sehne gerichtet und übt eine saugende, entlastende Wirkung auf die gewölbte Fläche F aus.

Eine zweite sehr kleine Querschnittsfläche Δf_2 des unterhalb hinstreichenden Luftbandes, welches dem Bogen vom Radius ϱ_2 und denselben Centriwinkel 2α mit der gleichen Geschwindigkeit v beschreibt, liefert einen analogen centrifugalen Krafttheil:

$$\Delta\omega_2 = \Delta f_2 \frac{\gamma}{g} v^2 \, 2 \sin\alpha,$$

dessen Wirkung gegen die Fläche, weil von unten ausgeübt, in drückendem nach oben hebendem Sinne zur Geltung kommt. Bemerkenswert ist, dass in dem Resultate der Krümmungsradius der Bogenbewegung, im ersten Falle ϱ_1, im zweiten Falle ϱ_2, verschwunden ist, und zwar deshalb, weil derselbe einmal bei dem Ansatze für die Menge der in Bewegung befindlichen Luft im Zähler, das anderemal im Ausdrucke für die Centrifugalkraft im Nenner erscheint. Der Krümmungsradius hat also auf die Formel keinen Einfluss, wohl aber der Ablenkungswinkel 2α und die Querschnittsgröße des abgelenkten Luftbandes.

Die herrschende Proportion $\dfrac{\Delta\omega_1}{\Delta\omega_2} = \dfrac{\Delta f_1}{\Delta f_2}$ lässt sich aussprechen in dem Satze:

Ein Luftbandquerschnitt von bestimmter Größe erzeugt, wenn er dieselbe Bogenablenkung (um den Centriwinkel 2α) erfährt, die gleiche Fliehkraftsgröße, mag er nun schon seine Bahn näher oder weiter vom Centrum O beschreiben.

Auf Grundlage dieses Satzes erhalten wir die volle Kraftwirkung W durch einfaches Zusammenlegen der Theilwirkungen aller mitsammen concentrisch laufenden Luftbandstreifen:

$$\Sigma\Delta f_1 + \Sigma\Delta f_2 = f_1 + f_2 = f.$$

Die resultierende Kraft ist hiernach:

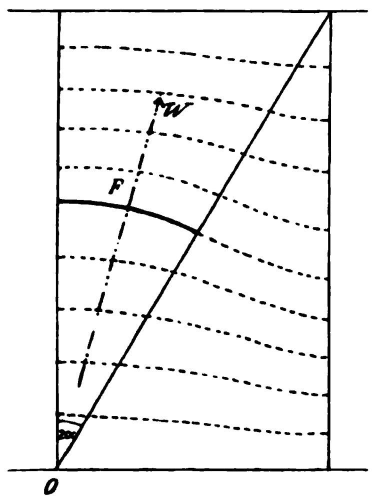
$$W = f \frac{\gamma}{g} v^2 \, 2 \sin\alpha \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 12)$$

Offen bleibt noch die Frage, wie groß dieser Querschnitt f eines ideellen concentrisch laufenden Luftbandes angenommen werden soll, damit seine Wirkung mit der thatsächlich vorhandenen Wirkung der verursachten Luftwelle identisch sei.

In Wirklichkeit nehmen bloß die zunächst der gewölbten Fläche geführten Lufttheilchen an der vollen Krümmung und an dem vollen Ablenkungswinkel 2α theil, die weiterabstehenden oberen und unteren Fadenlinien verlaufen flacher, besitzen geringere Ablenkungswinkel und haben andere weiter nach rechts von O und tiefer unten liegende Krümmungsmittelpunkte, so dass es schwer wird, eine allgemeine giltige Beziehung für die Größe des Querschnittes f

aufzustellen, zumal derselbe von dem Winkel 2α und auch von der Geschwindigkeit v abhängig sein mag. In der Figur 8, welche als das Viertheil der ganzen Luftwelle gelten kann, wird ersichtlich, wie die Linien der Luftfäden nach oben und unten bei gleichförmiger Abnahme ihrer Schwingungshöhen und Ablenkungswinkel sich allmählich den geraden Grenzlinien der horizontalen Luftbewegung anschließen; doch muss erwähnt werden, dass infolge der Eigenthümlichkeit der leichtbeweglichen Luft sich sanft und glatt verlaufende Wellenlinien fast niemals in vollkommener Reinheit herausbilden, sondern wegen des Vorhandenseins kleiner Dichte- und Geschwindigkeitsvariationen immer eine Neigung zu Wirbelbewegungen besteht, welche den Effect oft stark beeinträchtigt.

Fig. 8.



Aus zahlreichen praktischen Versuchen mit gewölbten Flächen * geht hervor, dass man gut zutreffende Luftwiderstandswerte erhält, wenn man bei Wölbungstiefen, welche $\frac{1}{12}$ bis $\frac{1}{16}$ der Sehnenlänge betragen und für Luftgeschwindigkeiten von 10 bis 20 Secundenmetern die ideelle Luftbandbreite je nach den begleitenden Nebenumständen der einfachen bis zweieinhalbfachen Sehnenlänge gleichsetzt, dass man also in der Gleichung 12) den Ansatz wählt:

$$f = F \text{ bis } 2{\cdot}5F,$$

wobei unter F die ebene Sehnenfläche verstanden ist.

Am besten ist es, die Gleichung des Luftwiderstandes gewölbter Flächen in der Form zu schreiben:

$$W = F\frac{\gamma}{g}v^2 m \sin\alpha \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 13)$$

worin dann der Factor m nach obigem $= 2$ bis 5 zu nehmen ist.

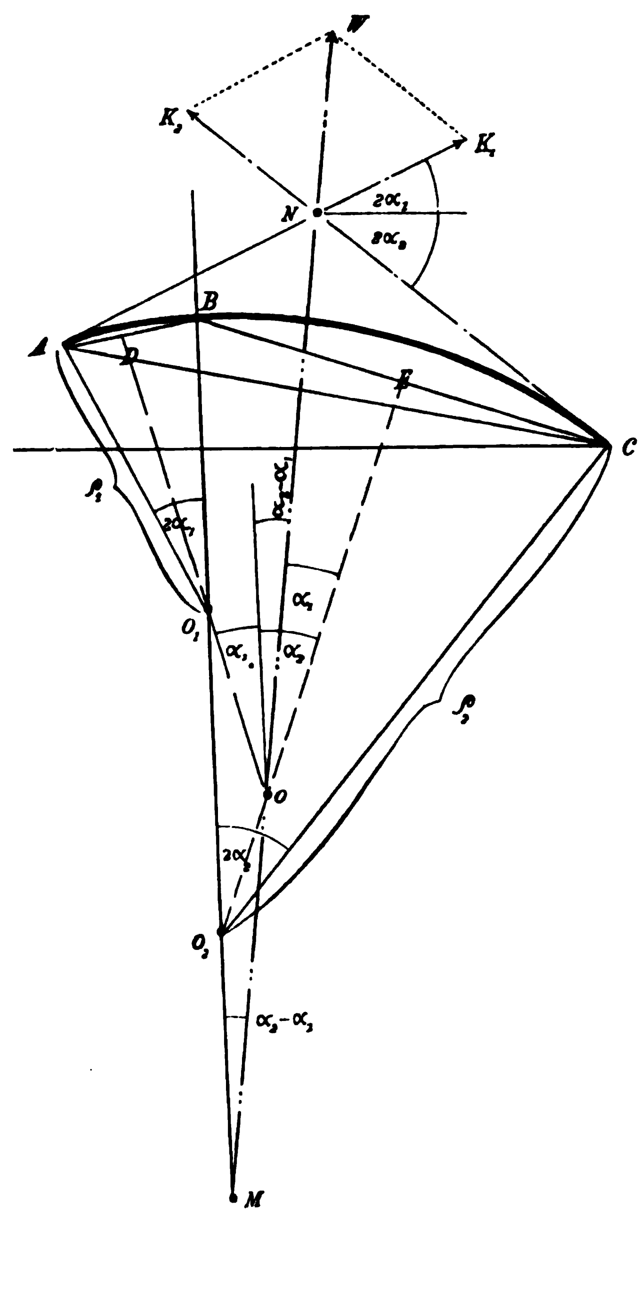
Da nun für ebene Schrägflächen nach Gleichung 5) dieselbe Formel mit einem Factor $m = 1$ gefunden wurde, erscheint der durch gewölbte Flächen erzielte Luftwiderstand 2- bis 5mal größer, wobei aber nicht vergessen werden darf, dass der Ablenkungswinkel für die Luftbewegung bei der kreisbogenförmig gewölbten Fläche 2α und die Elevation der Sehne, also auch jene der verglichenen ebenen Schrägfläche nur die Hälfte $= \alpha$ beträgt.

Noch besser gestaltet sich der Effect der gewölbten Flächen, wenn man die Vorderkante derselben nicht horizontal stellt, sondern klein wenig nach vorn überneigt, und weiters, wenn man den Bogen nicht kreisförmig gestaltet, sondern den vorderen Theil etwas schärfer krümmt als den rückwärtigen, so dass eine

* Siehe die Tafeln in Otto Lilienthals „Der Vogelflug als Grundlage der Fliegekunst“, Berlin 1889; ferner des Autors „Versuche mit gewölbten Flächen im Winde und auf Eisenbahnen“. Zeitschr. d. Österr. Ing.- und Archit.-Vereines in Wien, 1893, Heft 25 bis 28.

parabolische Form entsteht, wie wir sie an den Flügelprofilen der Vögel wahrnehmen. Der Vortheil, welchen eine derart geänderte Stellung und Krümmung der gewölbten Flächen mit sich bringt, besteht vornehmlich in dem günstigen Umstande, dass die Richtung des geweckten Luftwiderstandes sich etwas näher zur Verticalen vorschiebt, wodurch bei gleichbleibender Verticalcomponente (Wy = Auftrieb) die hemmende Horizontalcomponente (Wx = Vortrieb) kleiner, somit auch der Arbeitsbedarf zum Betriebe der Flächen geringer ausfallen kann. Die gewölbte Fläche ABC, Figur 9, ist aus 2 Kreisbogenstücken zusammengesetzt. An das Stück AB links von der Verticalen MB mit dem Radius ϱ_1,

Fig. 9.



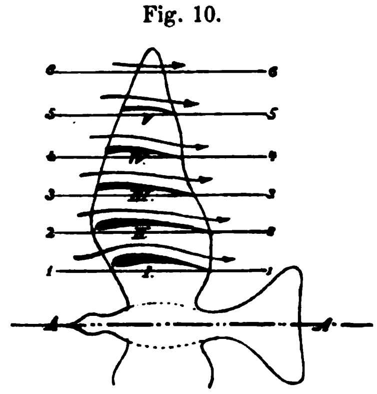
dem Centrum O_1 und dem Centriwinkel $2\alpha_1$ schließt sich rechterseits das Stück BC mit dem Radius ϱ_2, dem Centrum O_2 und dem Centriwinkel $2\alpha_2$. Die Actionskraft K_1 des längs der Fläche ziehenden Luftbandes steht im Anfangspunkte A und die gleichgroße Reactionskraft K_2 im Endpunkte B tangentiell zur Wölbung gerichtet; beide Kräfte setzen sich zur resultierenden Fliehkraft oder dem Luftwiderstade W zusammen, dessen Richtung sich folgendermaßen bestimmen lässt:

Die Linie OO_1D halbiert den Winkel $AO_1B = 2\alpha_1$,
" " O_2OE " " " $BO_2C = 2\alpha_2$,
" " MOW " " " $K_2NK_1 = 180 - 2(\alpha_1 + \alpha_2)$,

so dass der Neigungswinkel der Kraft W zur Verticalen BMW nur den Betrag $\alpha_2 - \alpha_1$ hat.

In Betreff der Breitenentwicklung der gewölbten Flächen quer zur Bildebene ist hervorzuheben, das schmale aber weitreichende, ovale, elliptisch abschließende Grundrissformen zweckmäßiger sind als langrechteckige von kleiner Breite. Scharfe Seitenränder sind zu vermeiden, weil an denselben die Berührung der wellenförmigen Luftfadenlinien mit den außerhalb daneben geradeaus streichenden Schichten schädliche Störungen veranlassen muss. Der normale Vogelflügel, Grundrissfigur 10, zeigt eine rundlich zugespitzte Form und in seinen Querrschnitten von der Körperachse AA zu den Flügelenden hin allmählich flacher werdende Wölbungen, damit die beim Fluge für den Auftrieb so wichtige Luftwelle nahe dem Körper die größte Schwingungshöhe entwickelt, nach außen hin weniger ausschwingend immer sanfter werdende Bogenlinien annimmt und sich an den Flügelspitzen in das äußere Luftmedium auflöst, ohne eine Beunruhigung zu verursachen. In der Figur sind die Querschnitte der Verticalebenen: 11, 22, 33 .... durch den Vogelflügel: I, II, III .... in die Bildfläche umgelegt und von einer Luftfadenlinie umgrenzt, in Darstellung gebracht.

Fig. 10.



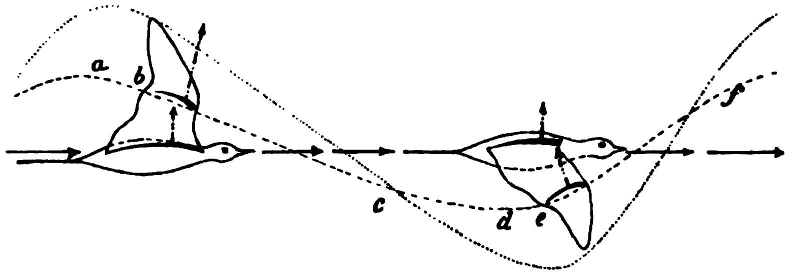
Die fliegenden Thiere.

Als lebendige Beispiele dynamischer Flugmaschinen stehen uns die fliegenden Thiere vor Augen.

Die meisten Vögel, die Fledermäuse und viele Insecten besitzen vermöge ihrer muskelkräftigen Flügel die Fähigkeit, sich lange Zeit in der freien Luft herumzubewegen.

Der Flugapparat des Vogels besteht im wesentlichen aus zwei auf- und niederschwingenden gewölbten Flügelflächen, deren Bahn zufolge des gleichzeitigen Vorwärtsfluges nach Wellenlinien verläuft; dabei erfahren die Flügelspitzen die größte Verdrehung und Schwingungshöhe, während die dem Vogelrumpfe zunächstliegenden breiten Flügelpartien fast horizontal bleiben.

Fig. 11.



In der Figur 11 sind die wachgerufenen Kräfte durch Pfeile versinnlicht. Der schräg abwärts geführte Flügelniederschlag *bc* schafft Auftrieb und Vortrieb; er hebt und beschleunigt den Flug; der unter einem steilerem Winkel schräg aufwärtsgerichtete Flügelaufschlag *ef* liefert nur wenig Auftrieb und etwas Hemmung und Verzögerung.

Übrigens sind die Methoden des Fliegens, deren sich die Thiere bedienen, sogar bei ein und demselben Individium sehr ungleich und in ihrer Verschiedenartigkeit hochinteressant.

Es gibt einzelne Vogelgattungen, welche nach mehreren Flügelschlägen gewöhnlichen Fluges einen kleinen Schwebeflug mit ruhig ausgebreiteten Flügelflächen einzuschalten pflegen, andere (so die Spechte und die meisten kleineren Vögel) werfen sich mit eingezogenen, knapp an den Körper gepressten Flügeln, damit das Durchschneiden der Luft möglichst wenig Widerstand biete, in flachen Parabelbögen durch die Luft, um dann jedesmal im Wellenthale, wo sie mit großer Geschwindigkeit anlangen, durch einige rasch aufeinanderfolgende heftige Flügelschläge, abstoßend an dem elastisch verdichteten Luftpolster, den nächstfolgenden Bogenflug einzuleiten. Einige Arten von Kolibris, dann die meisten Abendfalter, die großen Wasserlibellen und einige Fliegengattungen verstehen es meisterhaft, sich an Ort und Stelle in freier Luft schwirrend festzuhalten. Den meisten Vögeln ist diese Methode, in der Luft zu stehen, versagt; nur ausnahmsweise und nur für kurze Zeit unter heftig angestrengter Flügelthätigkeit bringen es einige Vogelarten, z. B. die Falken zuwege, an einem Orte flatternd stillezustehen; die große Mehrzahl der Vögel jedoch braucht den schnellen Vorwärtsflug als Vorbedingung, um sich die nothwendige Tragkraft zu schaffen. Die Fledermäuse haben einen flatternden Ruderflug. Kleine Flügel und raschen Flug finden wir immer beisammen. Die Fluggeschwindigkeit ist jedesmal der Flügelgröße und dem Eigengewichte des Vogels angepasst.

Je schneller die Vögel fliegen, desto leichter fliegen sie, mit desto weniger Kraftaufwand bewältigen sie die Flugstrecke.

Dagegen gestaltet sich bei relativ kleineren Flügeln der Anflug aus der Ruhelage schwieriger und erfordert unter Umständen eine gewaltige Anstrengung.

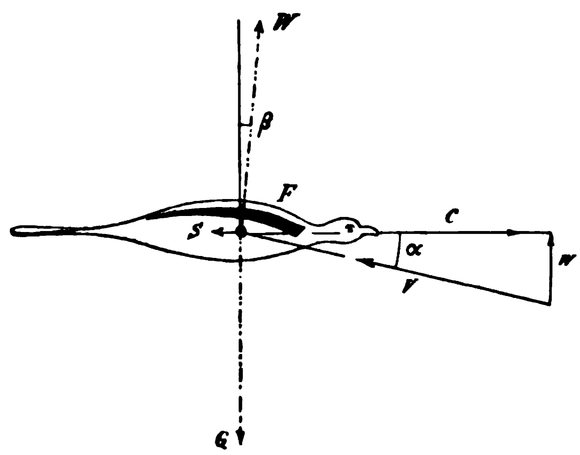
Wir erkennen dies an dem heftigen Geräusch, welches die Flügelschläge plötzlich aufgescheuchter Vögel verursachen.

Der Vogel wählt mit Vorliebe einen erhöhten Standpunkt, einen Baum, eine Felskuppe, einmal wegen des guten Ausblickes, dann aber auch wegen des bequemen Abfluges. Abfliegend senkt er sich ein gutes Stück herab, um die für das Tragvermögen seiner Flügelflächen erforderliche Anfangsgeschwindigkeit zu erlangen, bevor er horizontal oder aufsteigend weiterzieht.

Zu dem gleichen Behufe nehmen die Laufvögel, so z. B. Rebhüner, vor dem Abfluge oft einen raschen Anlauf und benützen dabei, wenn möglich, entgegenkommenden Wind. Der Rabe zeigt einen trägen Flügelschlag; die schweren Wasservögel steigen hart auf, beschreiben dabei Schraubenlinien unter Winkeln von 8—15° und verfolgen dann scharf gezogene Flugbahnen, während die leichten Schwalben einen weichen, sich elastisch wiegenden, selbst bei wechselnden Windstößen schmiegsamen Segelflug und Gleitflug üben; der Storch, die Haustaube, die Möwe sind vortreffliche Flieger; aus hunderterlei Beobachtungen lässt sich aller Orten lehrreiches Material schöpfen.*

Herausgegriffen und vorgeführt sei das Bild des vielbewunderten Schwebefluges der Geier, welche in lichter Höhe mit ausgespannten Fittigen mühelos, ohne Flügelschlag ihre Kreise ziehen, wenn über sonnenbestrahlten Bergkuppen warme Luftsäulen aufsteigen: Figur 12.

Fig. 12.



Die verhältnismäßig kleine verticale Windgeschwindigkeit w setzt sich mit der horizontalen Fluggeschwindigkeit des Vogels c zu einer resultierenden relativ zum Vogel schräg nach oben unter dem Winkel α gerichteten Luft-

* Über den Vogelflug sind einige sehr fleißige Studien veröffentlicht worden von: L. Kargel, Prechtl, Mouillard, dann:

A. v. Parseval: „Die Mechanik des Vogelfluges.“ Wiesbaden 1889;

Karl Steiger: „Vogelflug und Flugmaschine.“ München 1891;

Marey: „Le vol des oiseaux.“ Paris 1890, mit momentphotographischen Aufnahmen; ferner: „Über Insectenflug“ v. Dutczynski in der Zeitschr. f. Luftschiffahrt, 1893, Heft 7 u. 8.

geschwindigkeit v zusammen und weckt an den klein wenig nach vornüber geneigten Flügelflächen F einen Luftwiderstand W, welcher sowohl die Schwerkraft G, als auch den hemmenden Stirnwiderstand S zu bewältigen vermag, so dass ein stetiges Weitervorwärtsfliegen ohne Arbeitsleistung möglich wird.

Der Ausdruck für den Luftwiderstand gewölbter Flächen lautet nach Gleichung 13):

$$W = F \frac{\gamma}{g} v^2 m \sin \alpha,$$

worin hier wegen der guten Flügelform der Factor $m = 4$ und wegen der großen Höhenlage $\frac{\gamma}{g} = \frac{1}{9}$ angesetzt werden kann.

Das Gewicht des Geiers sei $G = 2\ kg$,
die Flügelfläche desselben $F = 0{\cdot}4\ m^2$,
folglich das auf $1\ m^2$ Fläche entfallende Gewicht $\frac{G}{F} = 5\ kg$.

Der Stirnwiderstand dürfte mit einem Betrage: $S = \frac{G}{100} = \frac{1}{50}\ kg$ wahrscheinlich noch zu hoch geschätzt sein und kann außeracht gelassen werden, weil der Winkel β zwischen der Kraft W und der Verticalen sehr klein ist.

Nach obigem ist $\operatorname{tg} \beta = \frac{S}{G} = 0{\cdot}01, \quad \beta = 0^{0}\,35'$.

Für das Gleichgewicht folgt, weil $v \sin \alpha = w$ ist, unter den gemachten Voraussetzungen

$$W = G = F \frac{mvw}{9}, \quad \frac{G}{F} = \frac{mvw}{9},$$

oder:

$$vw = \frac{9\,G}{mF}.$$

Unter Annahme eines Verticalwindes mit der mäßigen Geschwindigkeit: $w = 1\ sm$ ergibt sich:

$$v = \frac{9\,.\,5}{4\,.\,1} = 11{\cdot}25 \quad \text{und} \quad c = \sqrt{v^2 - w^2} = \sqrt{126{\cdot}56 - 1} = 11{\cdot}21\ sm,$$

d. h. sobald der Vogel mit $11{\cdot}21\ sm$ vorwärtsfliegt, bleibt er in gleicher Höhe schwebend; bei größerer Vorwärtsgeschwindigkeit steigt er noch in die Höhe. Ohne Vorwärtsflug dagegen, d. h. wenn der Verticalwind allein mit seiner Geschwindigkeit $w = 1$ senkrecht auf die ausgespannte Flügelfläche F von unten auftreffen würde, hätte der nach oben wirksam werdende Luftwiderstand nur den Betrag: $W_1 = Fw^2 \frac{\gamma}{g} = 0{\cdot}4\,.\,1\,.\,\frac{1}{9} = 0{\cdot}0444 \ldots kg$, welcher durchaus nicht genügen würde, das Vogelgewicht $G = 2\ kg$ zu tragen. — Erst infolge des Vorwärtsfliegens ist der mühelose Schwebeflug erreichbar.

Falls nun kein Verticalwind vorhanden sein, sondern Windstille herrschen würde, und der Vogel möchte bei festgehaltenen ausgebreiteten Flügeln mit der Geschwindigkeit $c = 11{\cdot}21\ sm$ vorwärtsfliegen, dann könnte er nicht in gleicher Höhe bleiben, und seine Flugbahn müsste secundlich um die verticale Strecke $w = 1\,m$ niedergleiten. Die Wirkung des Verticalwindes bringt es zuwege, dass dieses Herabsinken nicht eintritt, weil durch denselben eine Hebungsarbeit Gw geleistet wird. Wenn demnach ein solcher günstiger, Auftrieb schaffender Wind fehlt und der Vogel will dennoch horizontal weiter kommen, ohne zu sinken, dann kann er eben nicht mühelos schweben, er muss arbeiten, die Hebungsarbeit: Gw selbst verrichten; er muss Flügelschläge machen, deren Zweck im wesentlichen darin besteht, sich den fehlenden Unterwind gewissermaßen künstlich zu schaffen, indem die Flügelflächen durchschnittlich mit einer Geschwindigkeit w nach unten geführt werden. Die Muskelthätigkeit leistet in diesem Falle eine Arbeitsgröße: $A = Gw = 2 \,.\, 1 = 2\,smkg$, so dass sich hier der wichtige Quotient:

$$\frac{\text{Secundliche Arbeitsleistung des Vogels}}{\text{Getragenes Eigengewicht}} = \frac{A}{G} = w = 1 \text{ stellt.}$$

Hierbei ist aber immer noch der Vorwärtsflug vorausgesetzt. Ohne Vorwärtsflug und ohne Wind vermag sich der Vogel, wie schon erwähnt wurde, überhaupt nicht, oder nur mit außergewöhnlichen kräftigen Flatterbewegungen der Flügel an Ort und Stelle ruhend zu erhalten.

Wenn dagegen ein schräg nach oben ziehender Unterwind mit der Geschwindigkeit $v = 11{\cdot}25\,sm$ unter dem Winkel α der Figur 12 dem Vogel von unten schief entgegenbläst, so kann er in freier Luft an Ort und Stelle mit ausgebreiteten Flügeln, ohne Vorwärtsflug und ohne Flügelschlag schwebend bleiben, weil der erzeugte Luftwiderstand sein Gewicht ausgleicht; es ist das ein Zustand, welcher sich öfter dem Beobachter zur Sommerszeit im Gebirge darbietet und den Eindruck macht, dass sich der in der Luft ruhende Vogel behaglich fühle.

Schließlich sei noch der häufig vorkommende Fall in Betracht gezogen, dass der fliegende Vogel einem gewöhnlichen, horizontal wehenden Winde ausgesetzt ist. Wenn ein solcher Wind dem Vogel entgegenbläst, dann gestaltet sich das Auffliegen für denselben besonders leicht, aber zum Schwebendbleiben in gleicher Höhe ist ein Arbeiten mit den Flügeln unbedingt erforderlich.

Beträgt die Luftströmungsgeschwindigkeit: $c = 11{\cdot}21\,sm$, so muss gemäß der gemachten Ansätze und Rechnungen der Vogel seine Flügelflächen durchschnittlich mit einer Geschwindigkeit: $w = 1\,sm$ nach unten schlagen, damit der geweckte Luftwiderstand W sein Eigengewicht G zu tragen imstande sei; er steht dabei im Winde auf demselben Flecke, ohne vorwärts zu kommen und verrichtet secundlich eine Arbeit: $A = Gw$; der Wind hilft nur insoferne, als er den Vogel, selbst wenn derselbe keine Flügelschläge macht, nur langsam (in der Secunde um $w = 1\,m$) niedersinken lässt, während er ohne den Wind trotz der ausgebreiteten Flügel mit einer großen Geschwindigkeit herunterstürzen würde. Eine wirkliche Unterstützung und Arbeitserleichterung gewährt der Wind dem Vogel nur dann, wenn dem Winde, wie das öfter geschieht, eine (zumeist um circa 3^0) ansteigende Richtung innewohnt.

Wenn endlich der Vogel bei Windstille horizontal fliegen will, so hat er neben der Schwebearbeit Gw auch noch den Stirnwiderstand S zu bewältigen, also eine Vortriebsarbeit Sc zu leisten, welche jedoch im Verhältnisse zur Schwebearbeit gering ist. Die benützten Zahlenwerte $G = 2\,kg$, $S = 0{\cdot}01\,G = 0{\cdot}02\,kg$, $c = 11{\cdot}21\,sm$, $w = 1\,sm$ liefern an Auftriebsarbeit $A_1 = Gw = 2\,smkg$ und an Vortriebsarbeit: $A_2 = Sc = 0{\cdot}02 \,.\, 11{\cdot}21 = 0{\cdot}2242\,smkg$, folglich zusammen eine Leistung: $A = A_1 + A_2 = 2{\cdot}2242\,smkg$.

An der Hand des gewählten einfachen Beispieles gewinnt man einen guten Einblick in das innere Getriebe der von den Vögeln so meisterhaft geübten Fliegekunst; wir erkennen den wichtigen Einfluss, welchen die Fluggeschwindigkeit und die herrschenden Luftströmungen auf das Fliegen besitzen.

Wiewohl die Einzelheiten der Vorgänge mit allen ihren Nebenerscheinungen, welche sich in der Luft vor unseren Augen beim Fluge der Vögel abspielen, nicht näher besprochen wurden, erscheint das Gesagte doch genügend, um darin für das scheinbar so Wunderbare des Schwebens in freier Luft in ungekünstelter Weise die einfache Erklärung zu finden. Der Segelflug in seinen zahlreichen Abarten, das langsame Sinken beim schnellen Gleitfluge werden in ihrem Wesen begreiflich;* das Räthselhafte der Leichtigkeit, mit welcher die Vögel fliegen, löst sich in die greifbare, offenkundige Wirklichkeit auf, denn die Naturkräfte, deren Wirkung dabei im Spiele ist, enthalten nichts Geheimnisvolles, sondern beruhen auf der festen wissenschaftlichen Basis, welche durch die physikalischen Eigenschaften der Luft und durch die dynamischen Grundgesetze des Luftwiderstandes gegeben ist.

Die Flugmaschinensysteme.

Die üblichen Gattungen von Flugmaschinen lassen sich nach der Bewegungsart ihrer Tragflächen in zwangloser Weise in 3 Gruppen sondern, deren charakteristische Merkmale in Kürze vorgeführt sein mögen.

1. Die Drachenflieger.

Ihr Vorbild ist durch den bekannten Drachen gegeben, welcher an der Schnur gefesselt im Winde hochsteigt, weil die Luft an der Unterseite seiner Schrägfläche sich verdichtend einen dynamischen Druck nach oben ausübt. Die Schnur hält den Drachen, damit er vom Winde nicht weitergetrieben werde; kappt man die Schnur, so fällt er herunter.

Die Umkehrung des Bildes: Ein Drachen stehend im wehenden Winde liefert: einen Drachen, der sich in windstiller Luft vorwärtsbewegt; d. i. nichts

* Die von Ritter v. Lössl in seinem Buche „Über die Luftwiderstandsgesetze“ angegebene Methode, anstatt der Fläche F eine Fläche $F + bv_x$ in Rechnung zu ziehen, so dass eine mit der Geschwindigkeit wachsende Flächenvergrößerung um das Product aus der Flächenbreite b in die Flächengeschwindigkeit v_x eintreten würde, steht im Widerspruche mit seinen eigenen Gleichungen für Schrägflächen und hat in der Natur der Sache durchaus keine Berechtigung.

anderes als ein Drachenflieger, ein Drachenflugapparat, wie er schon in der Skizze Figur 1 dargestellt wurde. Der Vorwärtsflug schafft einen künstlichen Wind, dessen Luftwiderstand an der Schrägfläche das Herabsinken hindern, die schwebende Gleichgewichtslage erhalten soll.

Zu diesem Behufe sind die Drachenflieger ausgerüstet mit schrägen, am Gerüste des Fahrzeuges festgehaltenen Tragflächen und mit einem Motor zur Bewegung eines Treibapparates, welcher den Drachen der Luft entgegen vorwärtsschiebt. Zumeist sind es raschumlaufenden Luftpropeller, deren Abstoß an der umgebenden Luft, in analoger Weise wie bei den Wasserschrauben der Schiffe, den Vortrieb zu besorgen hat, doch sind auch anderweitige Propulsionsmethoden (durch Ruderräder, Ventilatoren etc.) vielfach in Vorschlag gebracht worden.

Unsicher gestaltet sich bei allen Drachenfliegern der Aufstieg in die Luft und das Landen, weil das Tragvermögen des Fahrzeuges sich erst durch den vorhandenen raschen Vorwärtsflug einstellt und ein Stillschwebendbleiben an Ort und Stelle ganz unmöglich ist. Ebenso bietet die Erzielung einer guten Stabilität des Fluges, insbesondere das feste Einhalten eines zweckmäßigen Flächenneigungswinkels kaum überwindliche gefahrvolle Schwierigkeiten, gegen welche man durch entsprechende Gewichtsvertheilung, durch drehbare oder verschiebbare Flügel- und Schwanzflächen vorzusorgen trachtet.

Die Bedingung für den horizontalen Schwebeflug lautet unter Beibehaltung der gebrauchten Bezeichnungen nach früherem:

$$\text{Gewicht} = \text{Auftrieb} = G = W_y = F\frac{\gamma}{g}v^2 m \sin\alpha\cos\alpha \quad \ldots \quad 14)$$

und der Arbeitsbedarf ist:

$$\eta A = W_x v = G v \operatorname{tg}\alpha = F\frac{\gamma}{g}v^3 m \sin^2\alpha \quad \ldots\ldots \quad 15)$$

worin der Factor η den Wirkungsgrad oder Nutzeffectscoëfficienten des Triebapparates vorstellt.

Die specifische Tragfähigkeit des Flugapparates ist:

$$\frac{G}{F} = \frac{\gamma}{g}v^2 m \sin\alpha\cos\alpha \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 16)$$

und die specifische Leistungsfähigkeit:

$$\frac{A}{G} = \frac{v \operatorname{tg}\alpha}{\eta} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots \quad 17)$$

Mit den hier gut passenden Wertansätzen:

$$\frac{\gamma}{g} = \frac{1}{8}, \quad m = 2{\cdot}5, \quad \eta = 0{\cdot}6, \quad \sin\alpha\cos\alpha \text{ nahe } = \operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{8}$$

würde folgen:

$$\frac{G}{F} = \frac{v^2}{25{\cdot}6} \quad \text{und} \quad \frac{A}{G} = \frac{v}{4{\cdot}8},$$

somit für $v = 16\ sm$,

$$\frac{G}{F} = 10 \text{ und } \frac{A}{G} = 3^1/_3, \text{ beziehungsweise } \frac{G}{N} = 22{\cdot}5 \text{ und } \frac{F}{N} = 2{\cdot}25.$$

Ein Drachenflieger mit einem Motor von N Pferdestärken dürfte 22·5 N Kilogramm schwer sein und müsste eine Tragfläche von 2·25 N Quadratmetern besitzen, wovon jeder Quadratmeter bei einer Fluggeschwindigkeit von 16 m in der Secunde 10 kg zu tragen hätte.

Es sind das Ziffernresultate, welche im Bereiche der Ausführbarkeit gelegen sind. Auch in Bezug auf die Constructionsmethode liefern die Drachenflieger zufriedenstellende Dispositionen, aber ihrer praktischen Ausführung und Ausprobung stehen die vorerwähnten Übelstände entgegen.

Aus den Gleichungen wird ersichtlich, dass die besten Effecte mit kleinen Tragflächen, kleinen Elevationswinkeln und großen Fluggeschwindigkeiten erzielbar seien.

Je kleiner die Tragflächen, desto schärfer muss geflogen werden, um den genügenden Auftrieb zu schaffen.

Es wäre das ein günstiges, die Luftschiffahrt als ein schnelles Post- und Personenbeförderungsmittel hinstellendes Moment; aber für je rascheren Flug der Drachenflieger bestimmt ist, desto gefährlicher macht sich die Kleinheit der Flügelflächen bei Beginn und am Ende der Fahrt geltend; und wenn das Flugschiff seine Bahn in der Luft einmal mit der vorgeschriebenen, seinem Gewichte und seinen Flügeln angepassten Geschwindigkeit durchsaust, dann muss es stetig weiterfliegen, wenn es auf gleicher Höhe bleiben soll, denn nur die Schnelligkeit der schrägen Tragflächen gegen immer neue Luftmassen verleiht ihm die Hebekraft; eine Verlangsamung der Fahrt bringt ein schnelles Niedergleiten oder ein Sichaufbäumen und Umkippen mit sich; ein Stillehalten in freier Luft ist gänzlich ausgeschlossen.

Trotz dieser Umstände sind die meisten der bis jetzt bekannten Flugmaschinenprojecte nach dem Drachenprincipe gebaut, und immer neue Zusammenstellungen werden in Vorschlag gebracht und Versuchen unterworfen.

An ausgeführten Apparaten dieser Art seien erwähnt:

a) Maxims Drachenflugmaschine aus dem Jahre 1894.

Mit echt amerikanischer Waghalsigkeit erbaute der bekannte Erfinder der Schnellfeuergeschütze, Hiram S. Maxim, unter Aufwand großer Mittel ein Drachenfahrzeug von außergewöhnlich großen Dimensionen.*

Eine Drachenhauptfläche nebst 5 Paaren flügelartiger Nebenflächen, zusammen 500 m^2 messend und unter 7° 25′ Elevation ($\operatorname{tg} \alpha = 1 : 7{\cdot}7$) auf einem Wagen montiert, wurde längs einer eigens dazu hergestellten Schienenrollbahn vorwärtsgetrieben. Ein Röhrendampfkessel mit 76 m^2 Heizfläche und Gasolinfeuerung, einschließlich des Wasserinhaltes von 100 l 650 kg schwer, erzeugte für kurze Zeit Dampf von 22·5 Atmosphären für eine doppelte Verbund-

* Zeichnungen und Angaben über die Versuche sind zu finden im „American Engineer and Railroad Journal“, October 1894; in „Aeronautics“, 1894, Heft 2, 4, 12; in der Zeitschrift für Luftschiffahrt, October 1894.

maschine mit Kolbensteuerung, welche bei 128 und 203 *mm* Cylinderdurchmesser, 305 *mm* Hub, 2 *m* Kolbengeschwindigkeit und 375 Touren in der Minute, bei einer mittleren wirksamen Dampfspannung von 13·7 und 8·8 Atmosphären im Hochdruck- und Niederdruckcylinder 360 effective Pferde leistete und 2 gegenläufige Luftpropeller von 5·4 *m* Durchmesser und 4·8 *m* Steigungshöhe in Umlauf brachte. Der gelieferte horizontale Vortrieb betrug angeblich beim Stillstande des Fahrzeuges 950 *kg* und während der Fahrt 900 *kg*. Dem Eigengewichte der ganzen Flugmaschine mit 2 Menschen Besatzung von 3640 *kg* stand eine bei 20·6 *sm* Fahrgeschwindigkeit erzielte Auftriebskraft von 4540 *kg* gegenüber, so dass ein Kraftüberschuss von 900 *kg* nach oben erübrigte, welcher die oberen Führungsschienen durchbrach, worauf das Fahrzeug sich aufbäumend zur Seite legte. Der Versuch war missglückt, weil die Steuerungsfähigkeit mangelte.

Die von je 1 m^2 Fläche erzeugte Tragkraft betrug dabei: $\frac{G}{F} = \frac{4540}{500} = 9{\cdot}08\,kg$.

Aus der zugehörigen Gleichung für Schrägflächen 16):

$$\frac{G}{F} = \frac{\gamma}{g} v^2 m \sin\alpha\cos\alpha = \frac{1}{8} \,.\, 20{\cdot}6^2 m \frac{1}{7{\cdot}8} = 9{\cdot}1$$

folgt, dass nur ein mäßiger Wert des Factors $m = 1{\cdot}75$ erreicht worden ist.

Die specifische Leistungsfähigkeit des Maxim'schen Fahrzeuges war:

$$\frac{A}{G} = \frac{75\,N}{G} = \frac{75\,.\,360}{4540} \text{ oder nahe } = 6$$

und weil hiefür auch die Beziehung 17): $\frac{A}{G} = \frac{v \operatorname{tg}\alpha}{\eta}$ besteht, ergibt sich ein recht schlechter Wirkungsgrad der Luftschraubenarbeit, nämlich:

$$\eta = \frac{G}{A} v \operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{6} \,.\, 20{\cdot}6 \,.\, \frac{1}{7{\cdot}7} = 0{\cdot}45.$$

Aus mehreren Stücken der Maxim'schen Construction ist eine gewisse Überhastung erkennbar, an welcher das gewagte und nicht reiflich vordurchdachte Experiment leiden musste.

b) Lilienthals Gleitflugversuche.

Der verdienstvolle Flugtechniker Otto Lilienthal in Berlin, welcher mit unermüdlicher Zähigkeit und Thatkraft den persönlichen Kunstflug pflegte und dem es auch schon öfter gelungen war, auf fallschirmartigen Flügeln bergab gegen Wind Wegstrecken bis zu 250 *m* im Gleitfluge schräg herabzuschweben,* starb am 18. August 1896 infolge eines Windstoßes, welcher den kühnen Flieger aus der Höhe herabwarf.

„Im Kampfe mit dem Winde fiel der Held;
Der Wind, mit dem er siegreich oft gerungen,
Hat seinen Meister nicht bezwungen;
Heimtückisch hat er ihn gefällt."

* Lilienthal beschreibt seine diesbezüglichen Arbeiten unter Beifügung von Lichtdruckbildern in der Zeitschrift für Luftschiffahrt, 1893, Heft 11.

Der wackere Mann hätte voraussichtlich noch Großes geleistet.

Lilienthals leichtgebaute, an den Enden zugerundete und sanftgewölbte Flügeln hatten eine Spannweite von 7 *m*, eine Breite von 2·5 *m*, ein Flächenausmaß von 14 m^2 und ein Gewicht von 20 *kg*, zu welchem sein Eigengewicht von 80 *kg* hinzukam. Die Flugbahn senkte sich, wenn Windstille herrschte, bei einer Fluggeschwindigkeit von 10 *sm* nach einem Neigungsverhältnis 1 : 6.

Die secundliche Niederfallarbeit betrug somit:

$$A = G v \operatorname{tg} \alpha = \frac{100 \, . \, 10}{6} = 167 \, smkg.$$

Die specifische Tragfähigkeit der Flächen war dabei:

$$\frac{G}{F} = \frac{100}{14} = 7{\cdot}1,$$

und da hiefür auch die Formel gilt:

$$\frac{G}{F} = \frac{\gamma}{g} v^2 m \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{8} \, . \, 100 \, m \, \frac{1}{6} = 7{\cdot}1,$$

ergibt sich der entsprechende Factor: $m = 3{\cdot}4$.

c) Das Drachenfliegerproject von Kress in Wien 1899.

Nachdem Herr Wilhelm Kress in Wien schon seit vielen Jahren kleine Drachenfliegermodelle mit einem gefälligen, freilich nur kurzdauernden Fluge hergestellt und vorgeführt hatte, bei welchen die freiwerdende Elasticität vorher scharf zusammengedrehter Kautschukschnüre die motorische Kraft für den Treibapparat lieferte, soll im heurigen Jahre unter Mitwirkung des flugtechnischen Vereines in Wien ein größeres ernstes Project gebaut und verwirklicht werden.

Das Gerüste des Fahrzeuges wird ausgestattet mit 3 oder 4 in schräger Linie hintereinanderliegenden Tragflächen von zusammen 80 m^2, ferner mit einer fächerförmigen horizontalen Schwanzfläche und einer drehbaren verticalen Steuerfläche am hinteren Ende. 2 Benzinmotoren, je 8 bis 10 Pferde stark und je 100 *kg* schwer, setzen 2 gegenläufige Luftschrauben in Umlauf, damit der nothwendige Vortrieb gewonnen werde.

Das ganze Luftschiff nebst 2 Mann Besatzung soll nur 600 *kg* wiegen und bei 9 bis 10 *sm* Fahrgeschwindigkeit sich fliegend in der Luft erhalten.

Die specifische Tragfähigkeit oder die Tragkraft von 1 m^2 Fläche lässt sich rechnen:

$$\frac{G}{F} = \frac{600}{80} = 7{\cdot}5 \, kg,$$

ebenso die specifische Leistungsfähigkeit des Drachenfliegers:

$$\frac{A}{G} = \frac{75 \, N}{G} = \frac{75 \, . \, 2 \, . \, 10}{600} = 2{\cdot}5.$$

Unter Annahme eines Wirkungsgrades $\eta = \frac{2}{3}$ für die Luftpropeller kann für den letzteren Quotienten die Beziehung 17) aufgestellt werden:

$$\eta \frac{A}{G} = v \operatorname{tg} \alpha,$$

so dass sich ergibt: $\operatorname{tg} \alpha = \eta \frac{A}{G} \frac{1}{v} = \frac{2}{3} \cdot \frac{2 \cdot 5}{10} = \frac{1}{6}$.

Ferner gilt für den ersten Quotienten die Gleichung 16), hier also:

$$\frac{G}{F} = \frac{\gamma}{g} v^2 m \sin \alpha \cos \alpha = \frac{1}{8} 100\, m \frac{1}{6} = 7 \cdot 5,$$

woraus der Factor $m = 3 \cdot 6$ ermittelt werden kann; es ist das ein Wert, welcher bei gut gewölbten Flächen immerhin erreichbar ist.

Man sieht, die Abmessungen sind richtig gewählt, die Ansätze zutreffend.

Unumwunden will ich meine Meinung dahin aussprechen, dass das Fahrzeug, wenn es gut ausgeführt sein wird, bei 10 bis 12 *sm* Geschwindigkeit die genügende Tragkraft erreichen kann, um frei in der Luft vorwärtszugehen; ich kann aber die Befürchtung nicht unterdrücken, dass sich die Sicherheit im Winde, das Eingreifen in die Stell- und Steuervorrichtungen der Flächen, sowie die Regelung des Motors als unzulänglich erweisen werden. Bei Kraftmangel wird ein jähes Heruntergleiten, bei Kraftüberschuss ein verlangsamtes Emporsteigen und schließlich ein seitliches Umkippen drohen.

Unter allen Umständen begrüße ich aufrichtigen Sinnes das auf österreichischem Boden geplante Experiment als eine Leistung von guter Vorbedeutung, welche durch ihr lehrreiches Material der Flugtechnik jedenfalls zugute kommen wird.

d) Von weiteren Drachenfliegern seien nur die Namen einiger Constructeure genannt:

Langley und Maxwell in England, Koch in München, Edison in Amerika, Hargrave in Australien, Tatin et Richet in Paris.

2. Die Schwingenflieger.

Dieser Gruppe von Flugapparaten liegt die Nachahmung der oscillierenden Flügelbewegung der Vögel zugrunde; sie ist wenig ausgebildet, weil die constructive Herstellung und der technische Betrieb großen Schwierigkeiten unterworfen ist. Schon die Schwingebewegung an und für sich, bei welcher die bewegte Masse der Flügeln abwechselnd einen Hin- und Hergang durchzumachen hat und zwar in elastischer Weise, wenn nicht Stöße auftreten oder übermäßige Arbeitsverluste erwachsen sollen, bietet erhebliche Bedenken gegen die praktische Ausführbarkeit, insbesondere bei größeren Dimensionen. Zudem erscheint es, weil nur der Flügelniederschlag vollwirksam arbeitet, der Flügelaufschlag aber leer gehen soll, nothwendig, entweder undurchlässige Flächen, welchen man achterförmig sich verdrehende Ruderbewegungen ertheilt, oder durchbrochene mit sich nach unten öffnenden Luftklappen ausgestattete Flächen anzuwenden, damit stets neue Luft von oben nach unten gedrückt werde. Dabei ist es rationell, zur Erzielung einer fortdauernden Hebewirkung mindestens 2 Paar gegenläufig schwingender Flügelgruppen anzuordnen und die Schwingung nicht vertical auf und ab, sondern von oben schief nach unten vorwärts und von unten schief nach oben rückwärts auszuführen.

Die Leichtigkeit, mit welcher die Vögel das Luftelement zu beherrschen verstehen, gibt zwar einen Beweis dafür, dass dynamische Flugmaschinen mit schwingenden Flügelflächen gut sein könnten, aber es folgt daraus keineswegs, dass diese Methode auch wirklich für uns die zweckmäßigste und beste sei, denn weder die vorzügliche Ausstattung des natürlichen Gefieders, noch der elastische, entsprechend bewegliche und regierbare Flügelschlag, dessen sich die mit allen Luftverhältnissen wohlvertrauten Vögel bedienen, wird sich durch menschliche Erzeugnisse und Mechanismen in so vollkommener Weise jemals nachmachen lassen. So sinnreich auch die Natur für ihre Zwecke die Vogelausrüstung geschaffen haben mag, der Mensch braucht sie für seine Zwecke nicht zu copieren, sondern soll auf Grundlage einer möglichst klaren Erkenntnis über das Wesen des Fluges in der Luft unter Rücksichtnahme auf die zu Gebote stehenden technischen Hilfsmittel die richtigste Wahl der Constructionsmethode zu treffen suchen.

Die Eisenbahnlocomotive ist dem schnellfüßigen Reh nicht nachgebaut und übertrifft es dennoch an Geschwindigkeit; desgleichen hat das Ruderrad und der Schraubenpropeller eines Dampfbootes mit der Flossenwirkung des Fisches nur das Princip der Repulsion gemein; das intermittierende Hin und Her ist durch einen stetigen Umlauf ersetzt; und ebenso wird auch die dynamische Flugmaschine der Zukunft voraussichtlich nicht den schwingenden Flügelschlag in Anwendung bringen, sondern die technisch bequeme Rotation.

Vom rein theoretischen Standpunkte müssen die Schwingenflieger allerdings als sehr günstige Flugapparate bezeichnet werden, zumal sie eine reiche Auswahl verschiedenartiger und schöner Constructionsanordnungen bieten; eine praktische Brauchbarkeit werden sie jedoch nur ausnahmsweise erlangen können, wenn es gelingen sollte, elastische Flügel von ganz hervorragend ausgezeichneter Bauart herzustellen.

3. Die Radflieger.

Das Streben nach Sicherheit und Stabilität, ebenso das Bedürfnis einer bequemen technischen Betriebsmethode führen gleichermaßen zur Anordnung von stetig im Kreise umlaufenden Flügelrädern.

Den einfachsten Fall dieser Art zeigen die Tragschrauben, beziehungsweise die Schraubenflieger mit einer verticalen Achse, an welcher rings im Kreise herum die Schrägflächen unter bestimmten Neigungswinkeln festgehalten sind, so dass bei eingeleiteter Rotation eine axiale Auftriebskraft im verticalen Sinne hervorgerufen wird. Die stetige Drehbewegung gewährt wegen der symmetrischen Bauart des Rades einen stoßfreien Gang, gestattet die Benützung hoher Geschwindigkeiten, denen zufolge die Abmessungen der Flächen kleiner ausfallen dürfen, und sichert vermöge der kinetischen Energie der umlaufenden Flügelradmasse die aufrechte Stellung der Drehachse. Nachtheilig ist dagegen die durch die ungleichen periferialen Geschwindigkeiten bedingte Ungleichförmigkeit der Flächenwirkung, sowie das Auftreten von Fliehkräften, welche ein stärkeres, wohlausgeglichenes Gefüge und festere Verbindungen des Flügelrades nöthig machen.

Schon das bekannte kleine Schraubenfliegerspielzeug der Knaben belehrt uns über die sichere und stabile Flugmethode der Flügelräder; was aber solche Apparate ganz besonders auszeichnet, das ist die Fähigkeit, an Ort und Stelle in freier Luft schwebend zu bleiben, durch welchen Umstand ein ruhiger Aufstieg und ein sicheres Landen möglich wird.

Während die Drachenflieger den raschen Vorwärtsflug unbedingt brauchen, damit eine hebende Kraftwirkung überhaupt zustande komme, und dabei die Sicherheit der Winkeleinstellung ihrer Tragflächen gegen die Luft, insbesondere bei Wind, vermissen lassen, wird hier die Tragkraft ohne Vorwärtsflug erzeugt, wobei die Flächen des Flügelrades in festbleibender Schräglage im Kreise herumgeführt werden. Zum Zwecke einer gewünschten horizontalen Vorwärtsbewegung müssen dann anderweitige Vorkehrungen getroffen sein, deren Beschaffung jedoch bei der Geringfügigkeit des hemmenden Stirnwiderstandes verhältnismäßig wenig Belang haben und nur einen kleinen Mehrbetrag an Arbeitsleistung fordern.

Die Wirkungsweise der Tragschrauben ist im wesentlichen derjenigen der Drachenflieger ähnlich, indem bei beiden die Vorbewegung ihrer Schrägflächen, einmal die geradlinige, das zweitemal die kreisförmige, den Auftrieb gebenden Luftwiderstand zu wecken bestimmt ist, doch müssen beide Fälle in einigen wichtigen Punkten unterschieden werden.

Die Tragflächen des Drachenfliegers treffen bei ihrem Vorwärtsfluge auf immer neue Luftmassen, welche sich unter denselben in gleichmäßiger Weise verdichten, die umlaufenden Flügelflächen der Luftschraube dagegen bewegen sich in den äußeren Partien rascher als in den der Drehachse näherliegenden, so dass sich eine Ungleichmäßigkeit der auftretenden Verdichtungen im radialen Sinne in der Art herausbildet, dass die Rechnung mit einer mittleren Umlaufsgeschwindigkeit des geometrischen Druckmittelpunktes den thatsächlichen Verhältnissen nicht entsprechen kann.

Außerdem entwickelt sich durch die Rotation der Tragschraube ein von oben nach unten ziehender Luftstrom, welcher die Wirkung der Schrägflächen schmälert, zumal die unvermeidliche Luftreibung auch noch störende Wirbelbildungen veranlasst.

Aus diesem Grunde wirken die Luftschrauben bei Wind und beim Vorwärtsfluge, ebenso beim Emporsteigen und Vordringen in immer neue Luftschichten besser und kräftiger als beim Stillestehen an gleichbleibender Stelle.

Weiters ist noch zu erwähnen, dass sich die Drehachse der Tragschrauben immer quer zur Flugrichtung schief zu stellen trachtet, weil die der Luft entgegenbewegte Seite des umlaufenden Flügelrades einen größeren Auftrieb äußert als die zurücklaufende andere Seite; um diesen Übelstand zu beheben, wird zumeist eine paarweise Anordnung gegenläufiger Schrauben in Vorschlag gebracht.

Nach diesen Ausführungen geht hervor, dass die kreisförmig umlaufenden Schrägflächen der Luftschrauben in ihrer Wirkung jener der geradlinig bewegten Drachenflächen nachstehen.*

An Gleichungen zur Berechnung der Tragschrauben können wir schreiben die specifische Tragfähigkeit: $\frac{G}{F} = \frac{\gamma}{g} u^2 m \sin\alpha \cos\alpha$ . . . . 18)

und die specifische Leistungsfähigkeit: $\frac{A}{G} = u \operatorname{tg}\alpha$ . . . . 19)

Hierin bedeutet u die Umlaufsgeschwindigkeit des Druckmittelpunktes, und es dürfte mit Rücksicht auf die vorliegenden Erfahrungen der Factor $m = 1$ bis $1{\cdot}5$ anzusetzen sein.

Mit den Annahmen: $\frac{\gamma}{g} = \frac{1}{8}$, $m = 1$, $\sin\alpha \cos\alpha$ nahe $= \operatorname{tg}\alpha = \frac{1}{8}$ würde folgen:

$$\frac{G}{F} = \frac{u^2}{64} \quad \text{und} \quad \frac{A}{G} = \frac{u}{8},$$

somit für $u = 24\,sm$

$$\frac{G}{F} = 9 \quad \text{und} \quad \frac{A}{G} = 3, \quad \text{beziehungsweise} \quad \frac{G}{N} = 25 \quad \text{und} \quad \frac{F}{N} = 2{\cdot}78,$$

oder in Worten ausgesprochen:

Ein Schraubenflieger mit einem Motor von N Pferdestärken darf ein Gewicht von $25\,N\,kg$ besitzen und muss dabei eine Tragfläche von $2{\cdot}78\,N\,m^2$ haben, wovon je $1\,m^2$ bei einer Umlaufsgeschwindigkeit von $24\,sm$ $9\,kg$ zu tragen hat.

Bei Vergleich dieser Ziffern mit den für die Drachenflieger gefundenen zeigt sich, dass unter Voraussetzung desselben Elevationsverhältnisses der Tragflächen $\operatorname{tg}\alpha = 1:8$ trotz des geringeren Factorenansatzes $m = 1$ an Stelle des dortigen $m = 2{\cdot}5$ ein nahezu gleich günstiges Ergebnis sich herausstellt. Die Ursache davon liegt darin, dass hier, wo ein directer Antrieb der umlaufenden Flächen vorhanden ist, der den Effect verringernde Wirkungsgrad $\eta = 0{\cdot}6$ entfällt und demgemäß eine entsprechend höhere Geschwindigkeit $\mu = 24\,sm$ anstatt der dortigen $v = 16\,sm$ gewählt werden kann.

Aus dem Resultate erhellt, dass die Ausführbarkeit von Tragschraubenfliegern mit verticalen Achsen durch die gegenwärtig zur Verfügung stehenden

* Siehe des Autors „Luftschraubenversuche“ in der Zeitschr. d. öst. Ing.- u. Arch.-Vereines 1894, Heft 33, 34, 147; dann „Versuche mit größeren Luftschrauben“, ebendaselbst 1896, Heft 35, 36.

technischen Hilfsmittel außer Frage steht, und es ist sehr bedauerlich, dass bisher noch kein größeres Project dieser Art der Verwirklichung zugeführt wurde. Der Autor erzielte bereits mit einfachen Luftschrauben von 3·5 m^2 Fläche und 25 *kg* Eigengewicht bei einer Geschwindigkeit von 40 *sm* im Druckmittelpunkte und einem Arbeitsaufwande von 4 Pferdestärken einen Auftrieb von 65 *kg*, und diese Leistung ist noch lange nicht das Maximum des Erreichbaren. Mit der Construction von Tragschrauben beschäftigen sich unter anderen: Popper, Kress und Jarolimek in Wien und Langley in London, doch findet die so wichtige praktische Seite der Sache leider nur wenig Anklang und Förderung.

Sobald man es dahinbringt, dass eine Tragschraubenanordnung eine größere Last mehrere Stunden lang freischwebend in der Luft zu halten vermag — und das ist mit einigem Geschick leicht erzielbar —, dann würde das anschauliche Bild einer derartigen dynamischen Flugerscheinung einen genügend kräftigen Ansporn geben, um diese Richtung schrittweise auf sicherem Wege weiter zu verfolgen, bis auch ein Mensch in die Höhe mitgenommen und schließlich zum seitlichen Vorwärtsfluge übergegangen werden könnte.

Außer den gewöhnlichen Tragschrauben mit verticaler Achse können auch Flugräder mit schiefgestellten oder horizontalen Achsen den Flugzwecken dienstbar gemacht werden, wenn durch Anbringung von festen Flächen an geeigneter Stelle oder durch Einführung einer schwingenden oder drehenden Nebenbewegung der umlaufenden Flächen eine Wirkung im hebenden Sinne hervorgeht.

Das vom Autor veröffentlichte Segelradsystem hatte auf horizontalen Längsachsen zwei Flügelradgruppen, deren drehbare Flächen während des Umlaufes durch eine eigenthümliche Excentersteuerung hin- und herbewegt wurden, damit hiedurch gewissermaßen eine technisch maschinelle Umgestaltung des Vogelflugmechanismus gewonnen werde.*

Das Project, anfänglich mit Jubel begrüßt, wurde nachträglich in ungerechter Weise angefeindet, weil die mangelhaften Experimente den allzuhoch gespannten Erwartungen nicht entsprachen. Die Versuche mit einem Proberade in Wien ergaben bei 12 m^2 totaler, also bei 6 m^2 wirksamer Flügelfläche für eine Geschwindigkeit von 15 *sm* mittels einer motorischen Leistung von 1·33 Pferdestärken einen Auftrieb von 43 *kg*, welche Ziffern principiell nicht als ungünstig bezeichnet werden können. Die Schwäche des Segelradsystems ruht vielmehr auf der constructiv-praktischen Seite, beziehungsweise in der Schwierigkeit der Bauart und Herstellung, welcher die gegenwärtigen Methoden der Fabrication nicht gewachsen sind.

Neben den vorangeführten drei Haupttypen von Flugmaschinen sind im Laufe der Jahre noch anderweitige Vorschläge in zahlreicher Menge

* Siehe hierüber den Vortrag „Über Segelradflugmaschinen“ in der Zeitschr. d. öst. Ing.- u. Arch.-Vereines 1893, Heft 50; und „Segelradversuche“, ebendaselbst 1894, Heft 50, 51.

aufgetaucht, und lassen sich unschwer vielerlei neue Gruppierungen, insbesondere Zusammenstellungen von festen Tragflächen und Flügelrädern ausfindig machen, ohne dass hieraus bisher nützliche Erfahrungen gewonnen worden wären; es ist hier nicht der Platz, näher darauf einzugehen.

Das Keilprincip.

Wenn wir Überschau halten über die Mittel zur Schaffung von Kräften in freier Luft auf dynamischem Wege, gelte es nun schon dem Auftriebe oder dem Vortriebe eines Flugapparates, so finden wir, dass vornehmlich nur eine einzige Methode ausgebildet ist, nämlich diejenige, welche auf dem Principe der schiefen Ebene oder dem Keilprincipe beruht.

Die mit dem vorderen Rande ein wenig schief gestellte Fläche wird keilförmig in den Luftkörper hineingeschoben, damit die Luft an der Fläche sich verdichtend einen Druck äußere.

Die Schrägflächen des Drachenfliegers haben nach aufwärts erhobene Vorderkanten und liefern bei ihrer Vorwärtsbewegung eine hebende Tragkraft, weil die unterhalb der Flächen zusammendrückte Luft nicht schnell genug ausweichen kann und einem elastischen Polster vergleichbar die Fläche empordrückt; die umlaufenden Schrägflächen der Treibschrauben mit wagrechten Achsen schneiden keilförmig quer in die Luft ein, um daran Abstoß nehmend oder Widerhalt findend den axialen Vortrieb zu schaffen; ebenso arbeiten die umlaufenden Schrägflächen der Tragschrauben mit verticalen Achsen, denen die unterhalb zusammengeschobene Luft als eine Stütze dient, welche den axialen Auftrieb darstellt.

Überall ist es die keilförmige Wirkung der Schrägfläche im Luftkörper, welche den dynamischen Druck wachruft.

Gleich wie bei den Keilmechanismen der festen Körper der ausgeübte Seitendruck im Verhältnis zu der angewendeten keiltreibenden Kraft umso größer ausfällt, je kleiner der Keilwinkel genommen wird, ebenso ist es auch bei Flugapparten in der Luft vortheilhaft, kleine Neigungswinkel ihrer Schrägflächen zu wählen, und was der Luft wegen ihrer dünnen Beschaffenheit und Nachgiebigkeit an Widerstandskraft abgeht, muss durch erhöhte Schnelligkeit der Keilbewegung wettgemacht werden.

Heißen wir: W_x die treibende Kraft,
W_y die erzeugte Querkraft,
α den Keilwinkel,
v die Geschwindigkeit der Keilbewegung und
A die dabei gebrauchte Arbeit,

so gelten im allgemeinen immer die schon oft berührten Formeln, welche im Wesen des Keilprincipes begründet sind:

$$W_x = W_y \operatorname{tg} \alpha$$

und

$$A = W_x v = W_y v \operatorname{tg} \alpha.$$

Nicht unerwähnt gelassen sei zum Schlusse die Bemerkung, dass es neben dem Keilprincipe noch andere Methoden gibt, um in freier Luft dynamische Kräfte zu wecken, auf denen sich neue, unter Umständen auch zum Ziele führende Typen von Flugmaschinen aufbauen lassen.

Allgemeine Beziehungen zwischen dem Flügelgewicht und Motorgewicht bei dynamischen Flugapparaten.

Für jede nach dem Keilprincipe gebaute Flugmaschine, also insbesondere für alle Drachenflieger und Schraubenflieger, lassen sich aus den günstigsten Verhältnissen zwischen der benützten Flächenelevation und Flächengeschwindigkeit, welche ein Maximum an Tragkraft zu erzielen vermögen, allgemeine Formeln ableiten, aus denen die beste Vertheilung des Gewichtes für die Flügelflächen einerseits und für den Motor anderseits hervorgeht.*

Die Gleichung für den Luftwiderstand von Schrägflächen lautet:

$$W = F\frac{\gamma}{g}v^2 m \sin\alpha, \qquad 20)$$

worin der Factor m für ebene Schrägflächen $= 1$, für gewölbte Flächen $= 2$ bis 5 zu setzen ist.

Für das Schwebegleichgewicht muss das getragene Gesammtgewicht des Luftfahrzeuges gleich sein der Verticalcomponente des Luftwiderstandes:

$$G = W_y = W\cos\alpha = F\frac{\gamma}{g}v^2 m \sin\alpha\cos\alpha \qquad 21)$$

Die Gleichung für die erforderliche Schwebearbeit ist:

$$A = W_x v = W\sin\alpha v = Gv\,\mathrm{tg}\,\alpha = F\frac{\gamma}{g}v^3 m \sin^2\alpha \qquad 22)$$

Die specifische Tragfähigkeit beträgt:

$$\frac{G}{F} = \frac{\gamma}{g}v^2 m \sin\alpha\cos\alpha \qquad 23)$$

Die specifische Leistungsfähigkeit ist:

$$\frac{A}{G} = v\,\mathrm{tg}\,\alpha \qquad 24)$$

und mit Elimination der Geschwindigkeit v gilt die Beziehung zwischen beiden:

$$\frac{G}{F} = \frac{\gamma}{g}\left(\frac{A}{G}\right)^2 \frac{m\cos^3\alpha}{\sin\alpha} \qquad 25)$$

Betrachten wir nun vorerst **einen Flugapparat, welcher nur aus den Flügelflächen und dem zu ihrem Betriebe nothwendigen Motor besteht**; das Gesammtgewicht sei in zwei Theile getheilt $G = G_1 + G_2$, nämlich G_1 das Gewicht der Flügelflächen,
G_2 das Gewicht des Motors sammt Zugehör.

* A. Jarolimek hat in dieser Richtung bemerkenswerte Calculationen in der Zeitschr. d. öst. Ing.- u. Arch.-Vereines, 1893, Heft 30 und 31, veröffentlicht.

Von Wichtigkeit für die Herstellung ist das **relative Flügelgewicht** oder das auf 1 m^2 Fläche entfallende Flügelgewicht in *kg*:

$$q = \frac{G_1}{F}$$

und von besonderer Bedeutung für die Construction der zugehörigen Betriebsmaschine das **relative Motorgewicht** oder die jedem Kilogramm des Motors zukommende Arbeitsleistung in *smkg*:

$$p = \frac{G_2}{A}.$$

Wir erhalten: $G = G_1 + G_2 = Fq + G_2$; die Division durch A gibt: $\frac{G_2}{A} = \frac{G}{A} - \frac{Fq}{A}$ und mit Einsetzung obiger Werte folgt:

$$p = \frac{G_2}{A} = \frac{1}{v \operatorname{tg} \alpha} - \frac{q}{v^3 \frac{\gamma}{g} m \sin^2 \alpha}.$$

Untersuchen wir diese Größe, die wir als eine Variable ansehen können, auf ihr Maximum bei gegebenem Winkel α, indem wir den Differentialquotienten nach v gleich Null setzen, erhält man:

$$\frac{dp}{dv} = 0 = \frac{1}{v^2 \operatorname{tg} \alpha} - \frac{3q}{v^4 \frac{\gamma}{g} m \sin^2 \alpha}$$

und hieraus:

$$v^2 = \frac{3q}{\frac{\gamma}{g} m \sin \alpha \cos \alpha} \qquad \text{. . . . . 26)}$$

Wenn diese Beziehung herrscht, so erreicht $p = \frac{G_2}{A}$, das ist das Gewicht des Motors im Verhältnis zu seiner Leistung seinen größtmöglichen noch zulässigen Wert; schwerer darf der Motor nicht sein, weil sonst die Flügelflächen ihr Gewicht nebst seinem Gewichte nicht mehr zu tragen imstande wären. Mit Einführung dieses äußersten Wertes in die Gleichung 23) ergibt sich

$$G = 3\,Fq = 3\,G_1$$

oder:

$$G_1 = \tfrac{1}{3}\,G, \quad \text{folglich} \quad G_2 = \tfrac{2}{3}\,G.$$

Dieses einfache Resultat lässt sich aussprechen:

Wenn ein Flugapparat nur aus den Flügelflächen und dem Antriebsmotor besteht, so darf für den schwebenden Gleichgewichtszustand auf den Motor äußerstens $\frac{2}{3}$, beziehungsweise es muss auf die Flügel mindestens $\frac{1}{3}$ des Gesammtgewichtes entfallen. Im günstigsten Falle kann und soll der Motor zweimal so schwer sein als die Flügelflächen.

Die zweckmässigste Gewichtsvertheilung ist somit:

Gewicht der Flügelflächen . . . . $G_1 = \frac{1}{3}\,G$
Gewicht des Motors . . . . . . $G_2 = \frac{2}{3}\,G$
zusammen das Totalgewicht des Flugapparates: G.

Betrachten wir nun eine Flugmaschine, welche außer dem Flügelgewichte G_1 und dem Motorgewichte G_2 noch eine weitere Last G_3, nämlich das Gerüst des Fahrzeuges mit sonstiger Ausstattung und Mannschaft zu tragen hat, so besteht das Totalgewicht aus 3 Theilen:

$$G = G_1 + G_2 + G_3,$$

und wir können ohne weiteres den Theil G_3 entweder als Zugehör zu dem Flügelgewicht G_1 oder als Zugehör zu dem Motorgewicht G_2 auffassen oder aber G_1 und G_2 zu den Flügeln sammt Betrieb als zusammengehörig und G_3 als abgesonderte Tragkraft ansehen, wodurch die Ungleichheiten zur Geltung kommen:

$$\begin{array}{rlcrl} G_1 + G_3 & \geqq \frac{1}{3}\,G & \qquad & G_2 & \leqq \frac{2}{3}\,G \\ G_1 & \geqq \frac{1}{3}\,G & & G_2 + G_3 & \leqq \frac{2}{3}\,G \\ G_1 + G_2 & \geqq \frac{1}{3}\,G & & G_3 & \leqq \frac{2}{3}\,G \end{array}$$

In Worten lässt sich dieses Ergebnis aussprechen:

Wenn eine Flugmaschine sich schwebend erhalten soll, muss das Gewicht der Flügelflächen mitsammt dem zu ihrem Betriebe nothwendigen Motor mindestens $\frac{1}{3}$ und darf das restliche Gewicht des Luftfahrzeuges äußerstens $\frac{2}{3}$ des Gesammtgewichtes betragen.

Die für die Verkehrsökonomie vortheilhafteste, in der Praxis leider kaum erreichbare Gewichtsvertheilung würde sich hiernach folgendermaßen herausstellen:

Gewicht der Flügelflächen		$G_1 = \frac{1}{9}\,G$
„ des Motors		$G_2 = \frac{2}{9}\,G$
„ des Fahrzeuggerüstes .	$\frac{2}{9}\,G$	
„ der sonstigen Ausstattung	$\frac{2}{9}\,G$	$G_3 = \frac{6}{9}\,G$
„ der Bemannung . . .	$\frac{2}{9}\,G$	
zusammen das Totalgewicht:		$G.$

Unterwerfen wir nun die der Sache zugrundeliegende Formel:

$$v^2 = \frac{3\,q}{\frac{\gamma}{g}\,m \sin\alpha \cos\alpha} \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 26)$$

einer näheren Prüfung.

Durch die gefundenen günstigen Werte: $G_1 = \frac{1}{3}\,G$ und $G_2 = \frac{2}{3}\,G$ erhält die specifische Tragfähigkeit des Flugapparates den Ausdruck:

$$\frac{G}{F} = \frac{G}{G_1}\,\frac{G_1}{F} = \frac{G}{G_1}\,q = 3\,q,$$

ferner die specifische Leistungsfähigkeit des Flugapparates den Ausdruck:

$$\frac{A}{G} = \frac{A}{G_2} \cdot \frac{G_2}{G} = \frac{1}{p} \cdot \frac{2}{3} = v \operatorname{tg} \alpha$$

und wir gewinnen unter Elimination von v eine Beziehung, welche sich auch unmittelbar durch Einführung der Größen q und p in die Gleichung 25) ergeben hätte, nämlich:

$$\frac{4}{9\,p^2\,\mathrm{tg}^2\,\alpha} = \frac{3\,q}{\frac{\gamma}{g}\,m\sin\alpha\cos\alpha}$$

oder:

$$\frac{\sin\alpha}{\cos^3\alpha} = \frac{m}{54\,q\,p^2}, \quad \ldots\ldots\ldots\ldots 27)$$

worin der Elevationswinkel α der benützten Schrägflächen einzig nur von den Größen q und p abhängig erscheint. Wenn also q und p durch die Constructionsverhältnisse der Flügelflächen und des Motors als bekannt vorauszusetzen sind, lässt sich der Winkel α ausrechnen und hieraus die zugehörigen Größen v und $\frac{A}{G}$.

Ein kurzes Beispiel diene zur Erläuterung:

Gewählt sei: $q = \frac{G_1}{F} = 4$, d. h. 1 m^2 Fläche durchschnittlich 4 *kg* schwer, ferner: $p = \frac{G_2}{A} = \frac{1}{6}$ oder $\frac{G_2}{N} = 12{\cdot}5$, d. h. die Betriebsmaschine pro Pferdekraft je 12·5 *kg* schwer, was bei dem heutigen Stande der Benzinmotorfabrication zutrifft, dann folgt für die weiteren Ansätze: $m = 2$ und $g : \gamma = 8$ aus den Formeln 26) und 27):

$$\mathrm{tg}\,\alpha = 0{\cdot}305, \quad \alpha = 17^0, \quad v = 13{\cdot}1\ sm, \quad \frac{A}{G} = 4.$$

Es sind dies durchwegs noch gut erreichbare Werte.

Durch die Gleichungen 26) und 27) ist ein einfaches Mittel an die Hand gegeben, ausgeführte oder projectierte Flugmaschinen in ihrer Leistungsfähigkeit untereinander zu vergleichen und in ihrer Zulässigkeit abzuschätzen.

Je größer das relative Flügelgewicht q und das relative Motorgewicht p angenommen wird, umso kleiner muss der erforderliche Elevationswinkel α der Schrägflächen ausfallen und umso höher steigt die nothwendige Flügelflächengeschwindigkeit v.

Schlusswort.

Überblickt man das weite Gebiet der flugtechnischen Arbeiten, so lässt sich erkennen, dass die theoretische Seite der vorliegenden Aufgaben in genügender Weise soweit klargelegt ist, um den Ausspruch zu rechtfertigen:

Der dynamische Flug ist mit den gegenwärtigen Mitteln der Technik möglich.

Wenn auch noch über ganz einfache grundlegende Fragen der Luftdynamik vollgiltige praktische Versuche fehlen, lassen sich doch selbst für verwickelte Anordnungen mit großer Sicherheit die Wirkungsweise des Vorganges und das Ergebnis schon im voraus bestimmen; aber in Bezug auf den Gesammtaufbau, welcher der Flugmaschine zu geben ist, stehen wir vor einem Wust von unfertigen Skizzen; weitausgreifende Irrsteige führen da hin und her und wieder zurück zwischen wuchernden falschen Anschauungen, welche nur langsam gelichtet werden, um den richtigen Weg frei zu bekommen zum angestrebten Ziele der Schiffbarmachung des Luftoceans. Nicht genug gewarnt muss werden vor allzukühnen, übereilten unvermittelt sprunghaften Experimenten ins Ungewisse, welche nachträglich nur Misstrauen in die Menge tragen. Ein zielbewusstes folgerichtiges sicheres Vorwärtsgehen, Schritt für Schritt, wie es schon bei Besprechung der Tragschrauben angedeutet wurde, kann nicht auf Abwege führen, sondern muss die gesuchte Lösung bringen. Wenn sie dann gefunden sein wird, wird man staunen darüber, dass diese Richtung des Weges nicht längst schon eingeschlagen wurde.

Die Frage, ob schließlich die Drachenflieger oder die Radflieger oder beide zusammen in entsprechender Verbindung in der Zukunft siegreich hervorgehen werden, hat vorläufig eine nur untergeordnete, nebensächliche Bedeutung, weil ja beiden Systemen noch nicht die Gegenwart gehört. Vorerst muss gezeigt und durch den unmittelbaren Augenschein bewiesen werden, dass es möglich sei, sich mehrere Stunden lang auf dynamischem Wege thatsächlich freischwebend in der Luft zu erhalten. Es braucht nur eines opferwilligen, geld- und thatkräftigen edlen Mannes, welcher durchdrungen wäre von jener festen Überzeugung, die den Autor beseelt, und die Sache gelingt; sie muss gelingen zum Ruhme des Mannes, zu Nutz und Frommen der Menschheit!

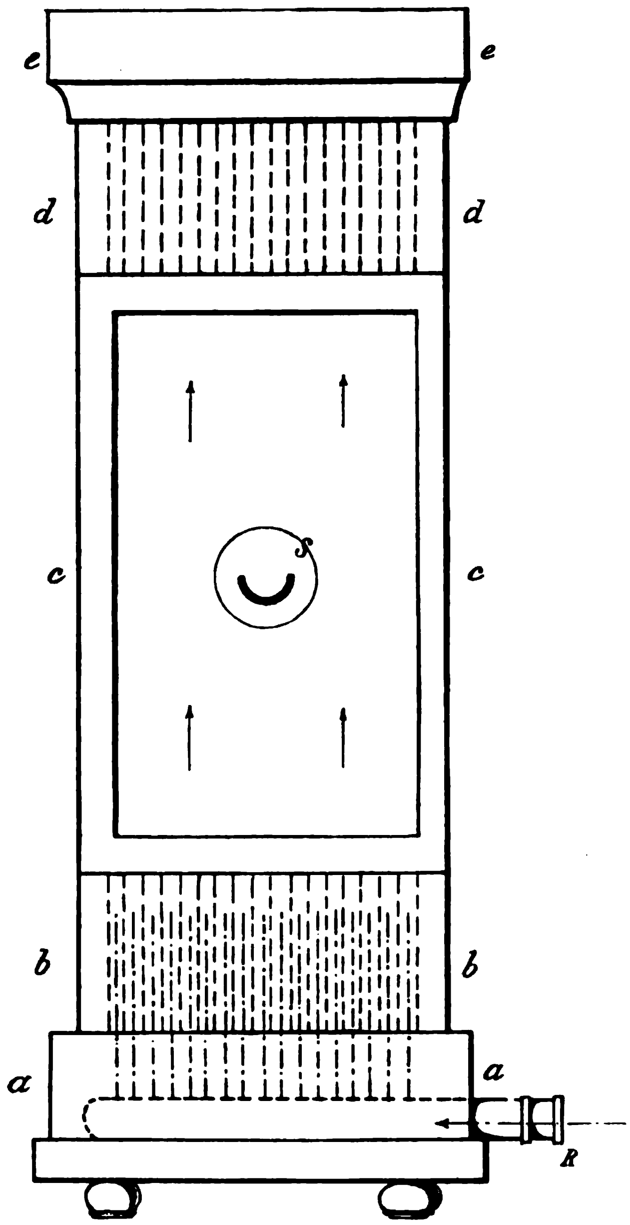
Apparat zum Sichtbarmachen der Fadenlinien bei Luftwiderstandserscheinungen.

Allgemein anerkannt für die Erkenntnis der Erscheinungen des Luftwiderstandes ist die große Wichtigkeit, jene Linien kennen zu lernen, nach welchen die strömende Luft an Widerstand gebenden Flächen und Körpern vorüberstreicht. Zu diesem Behufe construierte der Autor einen einfachen Apparat, welcher in dieser Beziehung anschauliche Bilder zu bieten vermag.

Ein Kasten, Figur 13, 900 *mm* hoch, 295 *mm* breit, im Lichten 15 *mm* tief, aus Holz gefertigt und luftdicht gefügt, enthält einen verticalen Canal von 245 *mm* Breite und 15 *mm* Tiefe, welcher sich in dem unteren Sockelstücke und in dem oberen Aufsatze zu einem größeren Raume ausweitet. Damit die in den unteren Raum *aa* eintretende Luft, welche in dem Canale vertical aufsteigen und aus dem oberen Raume *ee* abgeleitet werden soll, in ihrer Bewegung eine gute Führung erhalte, wurde der Luftcanal sowohl in der unteren Strecke *bb* als auch in der oberen Strecke *dd* durch dünne Bleche in 16 Kammern abgetheilt, so dass jede Kammer einen quadratischen Querschnitt von 15×15 *mm* besitzt.

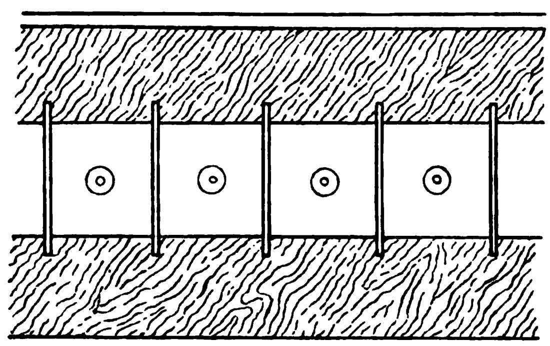
Zwischen beiden Führungen bei *cc* ist in der Vorderwand ein Fenster von 400 *mm* Höhe und 245 *mm* Breite eingesetzt, durch welches man hindurchschauen kann, und mitten in der hölzernen Rückwand befindet sich eine

Fig. 13.



Öffnung von 80 *mm* Durchmesser, in welche gut passende, in Sammt gedichtete Stöpsel S mit den zu untersuchenden Flächenformen eingeschoben werden können. Diese Formen, aus 1 *mm* starkem Blech angefertigt und genau um 15 *mm* über dem Stöpselboden vorragend, so dass sie sich vorn mit ihrer weißangestrichenen Stirnfläche an die Glaswand anlehnen und die ganze Tiefe des Canals von 15 *mm* ausfüllen, geben den Widerstand für das von unten nach oben rechts und links um sie herumstreichende Luftband. Zur Sichtbarmachung der Fadenlinien wurde nun Tabakrauch in folgender Weise mit sehr gutem Erfolge angewendet. Am Boden des unten im Kasten erweiterten Raumes *aa* ist von der Seite her ein 15 *mm* weites Messingrohr *R* luftdicht eingeführt, an welches sich nach oben 16 verticale dünne Röhrchen mit je 1 *mm* Düsenweite anschließen, und zwar so, dass jedes Röhrchen genau in die Mitte einer Kammer zwischen die Abtheilungsbleche zu stehen kommt. Die Figur 14 zeigt den Grundriss von 4 solchen Kammern mit ihren centralen Düsen in Naturgröße.

Fig. 14.



Durch diese Düsen steigt der Tabakdampf fadenförmig gleichzeitig mit der ihn umgebenden Luft empor und die entstehenden bläulich weißen Linien, welche sich von dem mattschwarz gehaltenen Hintergrunde gut abheben, lassen sich durch das Fenster vollkommen deutlich beobachten und abbilden. Wenn kein Widerstand gebender Körper, sondern nur ein mit einer glatten Grundfläche abschließender Stöpsel eingeschoben ist, ziehen die Rauchfäden geradeaus senkrecht in die Höhe und es sieht so aus, als ob der schwarze Hintergrund mit verticalen Strichen von weißlicher Farbe liniert wäre. Zur Einleitung und Führung der Luft im Canale des Kastens können Blasebälge, saugende oder druckende Gebläse benützt werden, doch ist es für die Reinheit und Stetigkeit der sich bildenden Rauchlinien besonders wichtig, darauf zu achten, dass die Luftbewegung möglichst gleichförmig und dass die Spannung der Luft in dem unteren Raume *a* und jene des Rauches im Rohre *R* vollständig gleich sei. Zum Zwecke einer andauernden Dampfentwicklung wurde Cigarettentabak in eigenen, dem Zwecke angepassten Glas- und Messingrohrpfeifen durch ein Wasserstrahlgebläse zur Verbrennung gebracht und der Dampf vor seiner Benützung in einem Wasserbade gewaschen.

Die zahlreichen und mühevollen Versuche wurden im chemischen Institute der technischen Hochschule in Brünn vorgenommen und war dem Autor dabei der Constructeur Herr Wacha, welcher auch die trefflichen photographischen Aufnahmen machte, behilflich.

Die nachfolgenden 2 Tafeln enthalten 18 aus der großen Anzahl der auf die beschriebene Art gewonnenen Photographien herausgegriffene Lichtdruckbilder in $^1/_5$ natürlicher Größe. Bei der Empfindlichkeit des Luftmediums mussten mehrere Vorkehrungen getroffen werden, bevor es gelungen war, alle

Unruhebewegungen in der Luft, alle Knoten- und Kräuselbildungen im Rauche auszuscheiden und ruhige, durch längere Zeit andauernd feststehende Bilder zu erhalten.

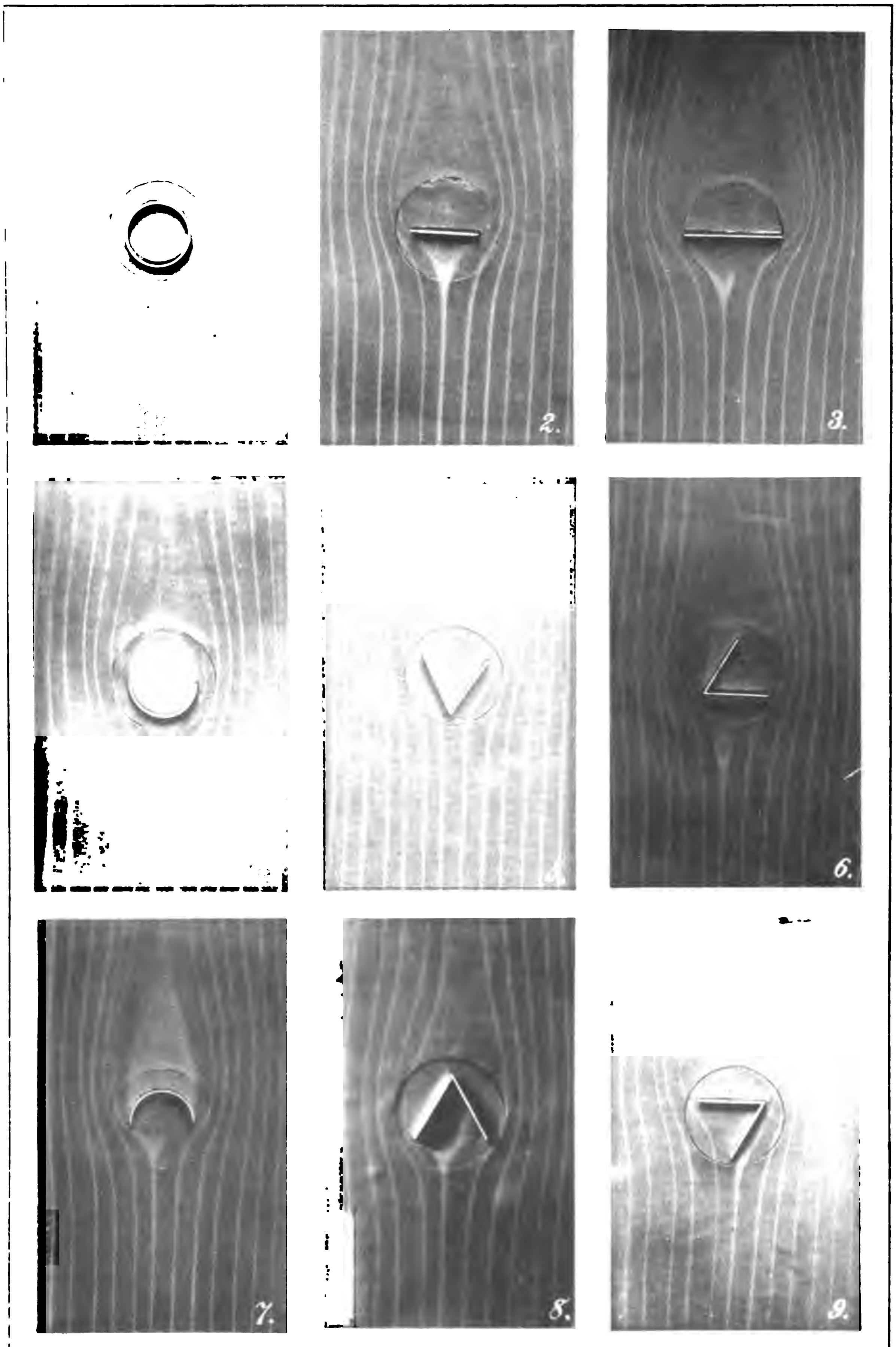
Die photographische Belichtungsdauer betrug zwischen 6 und 10 Secunden; die Kreislinie des Stöpselrandes, welche stellenweise hervortritt, ist ohne Bedeutung.

Auf sämmtlichen Abbildungen ist der bogenförmige Verlauf der an den Kanten der eingestellten Formen seitlich vorüberstreichenden und sich dann breiter ausbauchenden Rauch- und Luftfäden deutlich erkennbar, ebenso der sich vorn (unterhalb) aufbauende Stauhügel und der hinten (oberhalb) schopfartig angehängte Saugkeil, welche Räume mit ruhender Luft oder mit ruhendem Dampfe ausgefüllt blieben, wie das insbesondere in den Figuren 2, 4, 7, 10, 13 schön zu sehen ist.

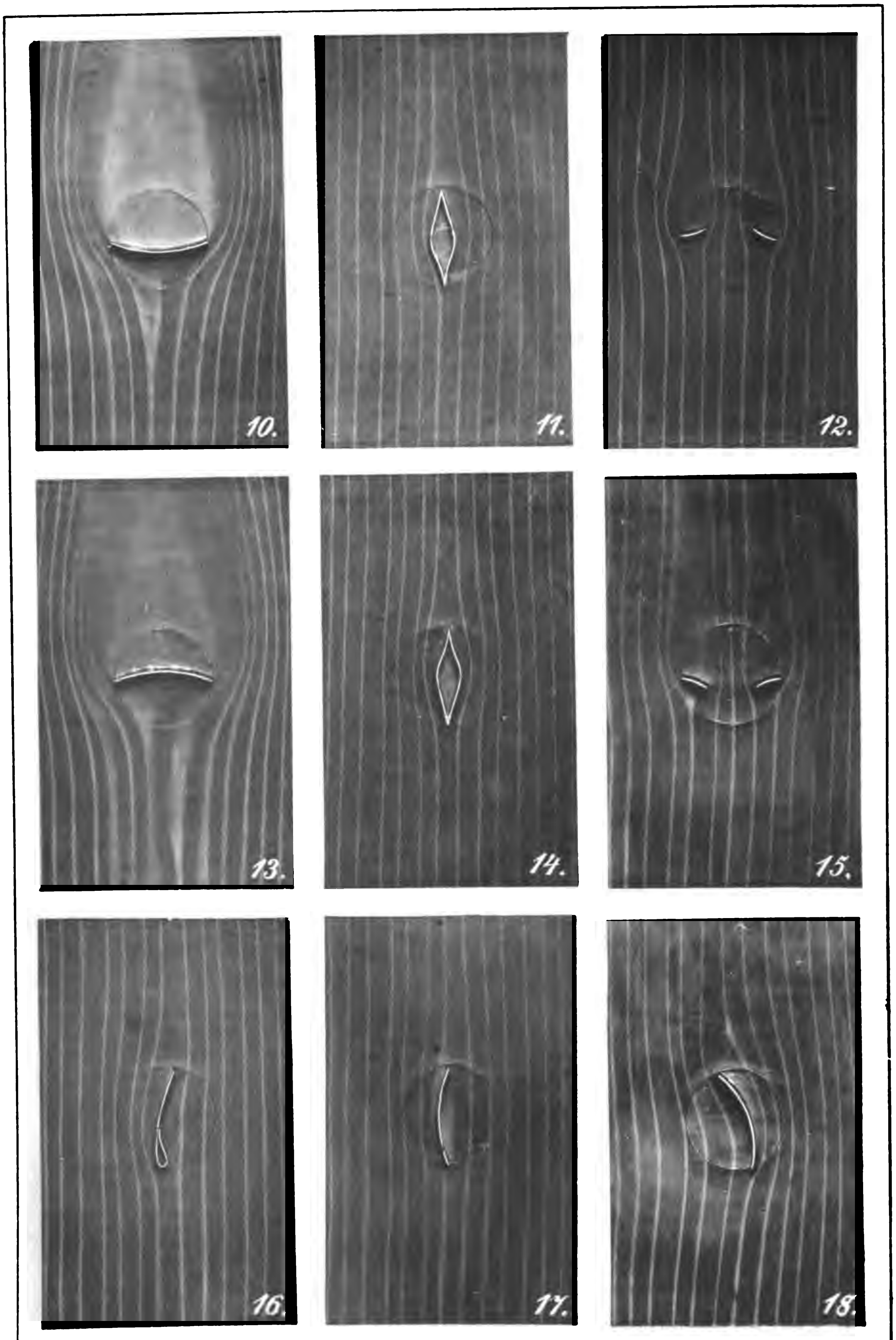
Die Breite des benützten Canales und Luftbandes war groß genug, um die störende Drosselwirkung des eingeschnürten Durchgangsquerschnittes fast ganz verschwinden zu machen, denn die äußersten Linien zu beiden Seiten der Bilder laufen schon nahezu glatt senkrecht von unten nach oben.

Aus diesen Bildern und den bei ihrer Entstehung gewonnenen Eindrücken und Wahrnehmungen lässt sich manches über das Wesen des Luftwiderstandes lernen; der Autor behält sich vor, die Folgerungen daraus, sowie die Ergebnisse in Betreff des wichtigen Einflusses der Geschwindigkeit der Luftbewegung auf die Form der Fadenlinien in einer später erscheinenden Schrift zu veröffentlichen.

TAFEL I.



TAFEL II.



FZZ 84/1

100